

Hochschule Mittweida

# **DIPLOMARBEIT**

Lars Stiebritz

Energiewirtschaftliche Analyse  
des BHKW - Einsatzes im Universitätsklinikum Jena

2010

Lars Stiebritz

Energiewirtschaftliche Analyse  
des BHKW - Einsatzes im Universitätsklinikum Jena

eingereicht als



**DIPLOMARBEIT**



an der

**HOCHSCHULE MITTWEIDA**  
**UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES**

Fachbereich Informationstechnik & Elektrotechnik

Jena, 2010

Erstprüfer:	Prof. Dr.-Ing. Ralf Hartig
Zweitprüfer:	Dipl.-Ing. (FH) Klaus Höhn

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am: 03.11.2010

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. (FH) Klaus Höhn vom Ingenieurbüro Haustechnik Höhn für die Möglichkeit, diese Diplomarbeit durchzuführen und für die fachliche Betreuung sowie die hervorragende Zusammenarbeit.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralf Hartig und Herrn Dipl.-Ing. Braumann von der Fachhochschule Mittweida, die sich während der Durchführung der Diplomarbeit sowohl für die Arbeit als auch für meine Fragen ausführlich Zeit nahmen, von ganzem Herzen danken.

Ein ganz spezieller Dank richtet sich an meine Partnerin Lydia Reisig und meine Eltern Bärbel und Reinhard Stiebritz, die mich während der gesamten beruflichen Entwicklung unterstützten.

### Bibliographische Beschreibung:

Stiebritz, Lars:

Energiewirtschaftliche Analyse des BHKW - Einsatzes im Universitätsklinikum Jena - 2010. - 108 S. Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), University of Applied Sciences, Fachbereich Informationstechnik & Elektrotechnik, Diplomarbeit, 2010

Krankenhäuser sind heute stärker denn je dem steigenden Kostendruck im Gesundheitswesen ausgesetzt. Gleichzeitig stehen diesen finanziellen Rahmenbedingungen ein permanent wachsendes medizinisches Leistungspotential sowie eine kontinuierlich steigende Lebenserwartung der Bevölkerung gegenüber. Die Möglichkeiten der heutigen Spitzenmedizin, wie sie am Universitätsklinikum Jena betrieben wird, erfordern ständig steigende finanzielle Ressourcen. Daher ist es wichtig, etablierte Strukturen und Verfahrensweisen auf ihre Wirtschaftlichkeit zu analysieren und mit neuen effizienteren Technologien zu vergleichen.

Die vorliegende Diplomarbeit widmet sich dieser Aufgabenstellung von Seiten der Energieversorgung. Es wird aufbauend auf den Kapiteln eins bis fünf analysiert, ob die Integration von Blockheizkraftwerken in ein Versorgungskonzept wirtschaftlich und ökologisch für das Universitätsklinikum Jena von Vorteil ist. Bevor diese Frage beantwortet wird, erfolgt im Kapitel zwei die Darstellung der theoretischen Grundlagen von getrennter und gekoppelter Energieerzeugung. Daran anschließend befasst sich das Kapitel drei detailliert mit der Beschreibung der verschiedenen BHKW-Technologien unter Abbildung des Standes der Technik und den möglichen Anwendungsfall im medizinischen Bereich. In weiterer Folge werden die wichtigsten Faktoren zur Planung, Auslegung sowie zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit ausführlich beleuchtet. Das Kapitel fünf stellt den praktischen Aspekt dieser Arbeit dar. Beginnend mit einer umfassenden Beschreibung der vorhandenen Medien und Strukturen im Universitätsklinikum Jena erfolgt im Weiteren die Ermittlung der erforderlichen Bedarfs- und Verbrauchswerte. Nach der Analyse aller relevanten Parameter der unterschiedlichen Energiearten und Konstruktion der signifikanten Jahresdauerlinien werden Aussagen zur Dimensionierung und Auswahl eines BHKW getroffen. Auf Grundlage dieser wird abschließend eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt und der Einsatz eines BHKW bewertet.

Hospitals are nowadays exposed to the cost pressure of the public health system more than ever. At the same, these general financial conditions are faced with a permanently improving medical performance potential as well as a continuously rising life expectancy of the population. The current high-tech medicine as practiced at Jena's university clinic requires constantly increasing financial resources. It is therefore important to analyze the cost effectiveness of established structures and technologies.

This diploma thesis is approaching the topic from the angle of the energy supply. It examines, based on chapters 1 - 5, whether the integration of combined heat and power (CHP) plants into a supply strategy has economic and ecological advantages for the Universitätsklinikum Jena. Before this question will be comprehensively answered, the theoretical foundations of the separate and combined energy production are presented and discussed in chapter 2. This is followed by a detailed description of various CHP technologies by giving due regard to the state-of-the-art and possible applications in the field of medicine. The following chapter describes in all detail the most important factors concerning the planning, the design and the assessment of the cost-effectiveness. Chapter 5 then analyzes all relevant parameters, after the existing and future energy supply structures in the Universitätsklinikum Jena have been extensively discussed. The possible use of a CHP plant will eventually be assessed on the basis of this and the resultant evaluation of economic efficiency.

Vorwort .....	I
Kurzfassung .....	II
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis .....	IX
Abkürzungsverzeichnis .....	X
1        Einleitung .....	1
1.1    Motivation.....	1
1.2    Ausgangssituation.....	3
1.3    Aufgabenstellung .....	4
2        Erzeugungstechnologien.....	5
2.1    Getrennte Energieerzeugung .....	5
2.1.1    Kondensationskraftwerke .....	5
2.1.2    Heizwerk .....	6
2.2    Kraft-Wärme-Kopplung .....	6
2.2.1    Physikalische Grundlagen.....	8
2.3    Gekoppelte Energieerzeugung .....	12
2.3.1    Heizkraftwerk .....	12
2.3.1.1    Dampfturbinen-Heizkraftwerk (DT).....	12
2.3.1.2    Gasturbinen-Heizkraftwerk (GT) .....	14
2.3.1.3    Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerk (GuD) .....	15
3        Block-Heizkraftwerk (BHKW) .....	16
3.1    Begriffsbestimmung .....	16
3.2    Einsatzmöglichkeiten und allgemeine Funktionsweise eines BHKW ..	18
3.2.1    Einsatzmöglichkeiten eines BHKW .....	18
3.2.2    Allgemeine Funktionsweise eines BHKW .....	19
3.3    Brennstoffe.....	20
3.3.1    Fossile Energieträger .....	20
3.3.2    Regenerative Energieträger .....	21
3.4    BHKW-Technologien.....	24
3.4.1    Verbrennungsmotoren-BHKW .....	24
3.4.1.1    Wärmeauskopplung .....	25
3.4.1.2    Emissionen .....	26
3.4.1.3    Zusammenfassung.....	27

3.4.2	Mikro-Gasturbinen-BHKW .....	28
3.4.2.1	Wärmeauskopplung .....	28
3.4.2.2	Emissionen .....	29
3.4.2.3	Zusammenfassung.....	29
3.4.3	Stirlingmotoren-BHKW .....	30
3.4.3.1	Wärmeauskopplung .....	31
3.4.3.2	Emissionen .....	31
3.4.3.3	Zusammenfassung.....	31
3.4.4	Brennstoffzellen-BHKW .....	32
3.4.4.1	Wärmeauskopplung .....	33
3.4.4.2	Emissionen .....	33
3.4.4.3	Zusammenfassung.....	34
3.5	Stromerzeugung und Netzanbindung.....	34
3.6	Wärmeversorgung und Hydraulische Einbindung .....	35
3.7	Zusammenfassung.....	39
4	Planung und Auslegung von Blockheizkraftwerken .....	40
4.1	Ermittlung des elektrischen und thermischen Energiebedarfs .....	40
4.1.1	Ermittlung Wärmebedarf und Wärmeleistungsbedarf.....	41
4.1.2	Ermittlung des Strombedarfs.....	43
4.2	Betriebsweisen.....	44
4.2.1	Wärmegeführte Betriebsweise .....	44
4.2.2	Stromgeführte Betriebsweise .....	45
4.3	Auswahl und Dimensionierung eines BHKW .....	46
4.3.1	Berücksichtigung der gesetzlichen u. umweltrelevanten Vorschriften	48
4.4	Wirtschaftlichkeitsrechnung .....	49
4.4.1	Investitionsrechnung .....	49
4.4.2	Annuitätenmethode .....	50
4.4.3	Kosten- und Einnahmenübersicht .....	51
4.4.4	Sensitivitätsanalyse.....	52
5	Energiewirtschaftliche Analyse des BHKW - Einsatzes im UKJ .....	53
5.1	Bestandsanalyse der Energiearten und Strukturen im 1. BA .....	54
5.1.1	Strom .....	55
5.1.1.1	Installierte Leistung, installierte Anlagen .....	55
5.1.1.2	Verbrauchswerte 2009 .....	56
5.1.2	Hochdruckdampf (HDD) / Erdgas .....	58
5.1.2.1	Installierte Leistung, installierte Anlagen .....	58
5.1.2.2	Verbrauchswerte 2009 .....	59

5.1.3	Kälte .....	60
5.1.3.1	Installierte Leistung, installierte Anlagen .....	60
5.1.3.2	Verbrauchswerte 2009 .....	60
5.1.4	Wärme .....	61
5.1.4.1	Installierte Leistung, installierte Anlagen .....	61
5.1.4.2	Verbrauchswerte 2009 .....	61
5.2	Bedarfsanalyse .....	64
5.2.1	Bedarfwerte und Leistungsdaten Strom .....	65
5.2.2	Bedarfwerte und Leistungsdaten HDD .....	66
5.2.3	Bedarfwerte und Leistungsdaten Kälte .....	66
5.2.4	Bedarfwerte und Leistungsdaten Wärme .....	67
5.2.5	Zusammenfassung der Bedarfwerte und Leistungsdaten .....	69
5.3	Konzepterstellung und Auslegung der Versorgungsvarianten .....	70
5.3.1	Potentialanalyse und Variantenvorauswahl .....	70
5.3.2	Variantendefinition .....	71
5.3.2.1	Variante 1 – Dezentrale Fernwärme .....	72
5.3.2.2	Variante 2 - Zentrale BHKW-Anlage .....	73
5.3.2.3	Variante 3 - Zentrale Kesselanlage .....	76
5.4	Wirtschaftlichkeitsanalyse der Versorgungsvarianten .....	78
5.4.1	Kapitalgebundene Kosten .....	78
5.4.2	Verbrauchsgebundene Kosten .....	79
5.4.3	Gutschriften Erlöse .....	81
5.4.4	Betriebsgebundenen Kosten .....	83
5.4.5	Emissionen .....	84
5.4.6	Sensitivitätsanalyse .....	85
5.5	Zusammenfassung .....	87
6	Resümee und Ausblick .....	89
Anhang	.....	90
Literaturverzeichnis	.....	XII
Erklärung	.....	XV



Abbildung 1: Bettenanzahl & Energiekosten Krankenhäuser in Deutschland .....	1
Abbildung 2: Primärenergieeinsparung der Kraft-Wärme-Kopplung .....	7
Abbildung 3: Rechtsläufiger Kreisprozess .....	9
Abbildung 4: Linksläufiger Kreisprozess .....	9
Abbildung 5: Ablauf des Carnot-Kreisprozesses im pV-Diagramm .....	9
Abbildung 6: Dampfturbinenprozess .....	13
Abbildung 7: Dampfturbinenprozess .....	14
Abbildung 8: GUD-Prozess .....	15
Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau eines BHKW .....	18
Abbildung 10: KWK-Prinzip & Brennstoffe .....	20
Abbildung 11: Energiegehalt Gasarten .....	23
Abbildung 12: BHKW-Prozess .....	26
Abbildung 13: Übersicht Abgasreinigung .....	27
Abbildung 14: Stirling-Prozess .....	31
Abbildung 15: Netzanbindung eines mehr Modul BHKW .....	35
Abbildung 16: Hydr. Reihenschaltung .....	38
Abbildung 17: Hydraulische Parallelschaltung .....	38
Abbildung 18: Leistung- und Wirkungsgradübersicht von KWK-Technologien ..	39
Abbildung 19: Wärmebedarfsverlauf .....	42
Abbildung 20: Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs .....	43
Abbildung 21: Wochenlastgang Strombedarf .....	43
Abbildung 22: Wärmegeführtes BHKW .....	45
Abbildung 23: Stromgeführtes BHKW .....	46
Abbildung 24: Bestimmung der Vollaststunden einzelner BHKW Module .....	47
Abbildung 25: Universitätsklinikum Jena - Lobeda 1.BA .....	53
Abbildung 26: Bauabschnittsübersicht .....	54
Abbildung 27: Übersicht Mittelspannungsring .....	55
Abbildung 28: Übersicht Notstromaggregate .....	55
Abbildung 29: Monatlicher Stromverbrauchswerte .....	56
Abbildung 30: Monatlicher Spitzenleistung .....	56
Abbildung 31: Jahresdauerline und Jahreslastgang der Stromleistung .....	57
Abbildung 32: Wochenlastgänge Stromleistung - Maximum und Minimum .....	57
Abbildung 34: Monatlicher HDD-Verbrauch .....	58
Abbildung 35: Wochenlastgänge HDD-Verbrauch - Maximum und Minimum .....	58
Abbildung 33: HDD-Anlagenübersicht .....	58
Abbildung 36: Jahresdauerline und Jahreslastgang HDD .....	59
Abbildung 37: Standorte Kompressionskältemaschinen .....	60
Abbildung 38: Standorte Fernwärmestationen .....	61
Abbildung 39: Monatlicher Fernwärme-Verbrauch .....	62

---

Abbildung 40: Wochenlastgänge Fernwärme-Verbrauch.....	62
Abbildung 41: geordnete Jahresdauerline Wärme .....	63
Abbildung 42: geordnete Wärmebedarfsjahreslinie 1. und 2. BA.....	69
Abbildung 43: Schematische Darstellung Variante 1 mit Wärmebedarfsmenge .	72
Abbildung 44: Schematische Darstellung Variante 2 mit Wärmebedarfsmenge .	73
Abbildung 45: Schematische Darstellung Variante 2 mit Strombedarfsmenge ..	74
Abbildung 46: Hydraulische Einbindung BHKW 1. und 2. BA .....	75
Abbildung 47: Schematische Darstellung Variante 3 mit Wärmebedarfsmenge .	76
Abbildung 48: Beispielhafter Aufbau einer Heizungszentrale .....	77
Abbildung 49: Kosten für Instandhaltungsvertrag von BHKW .....	83
Abbildung 50: Sensitivitätsanalyse der Wärmegestehungskosten .....	85

Tabelle 1: Wirkungsgrade BHKW-Verbrennungsmotoren (11) .....	25
Tabelle 2: Übersicht der installierten elektrischen Leistungen im 1. BA.....	56
Tabelle 3: Übersicht Kälteleistung 1.BA.....	60
Tabelle 4: Fernwärmeanschlußleistung 1.BA.....	61
Tabelle 5: Raumprogramm 1. Bauabschnitt.....	64
Tabelle 6: Raumprogramm 2. Bauabschnitt.....	65
Tabelle 7: Zusammenfassung der Bedarfswerte.....	69
Tabelle 8: Variantenvorauswahl.....	71
Tabelle 9: KFW-Förderprogramme .....	79
Tabelle 10: Zusammenstellung der Kapitalkosten der Varianten .....	79
Tabelle 11: Zusammenstellung der Verbrauchskosten der Varianten.....	81
Tabelle 12: Übersicht für Zusatzvergütung aus vermiedener Netznutzung.....	81
Tabelle 13: Übersicht Steuerbefreiung für hocheffiziente KWK-Anlagen .....	82
Tabelle 14: Vergütungsübersicht gemäß Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz .....	82
Tabelle 15: Zusammenstellung der Gutschriften der Varianten .....	82
Tabelle 16: Zusammenstellung der Betriebskosten der Varianten.....	84
Tabelle 17: Zusammenstellung der CO <sub>2</sub> -Emissionen der Varianten .....	85
Tabelle 18: Zusammenstellung der Wärmegestehungskosten der Varianten ....	85
Tabelle 19: Übersicht zur Wirtschaftlichkeitsberechnung der Varianten .....	87

1.BA	1. Bauabschnitt
2.BA	2. Bauabschnitt
AFC	Alcaline Fuel Cell
ASUE	Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BHKW	Block-Heizkraftwerk-Anlage
BSV	batteriegestützte Stromversorgung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CH <sub>4</sub>	Methan
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO	Kohlenmonoxid
ca.	circa
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
Dipl.-Ing.	Diplom-Ingenieur
Dr.	Doktor
DT	Dampfturbinen-Heizkraftwerk
EEG	Erneuerbare-Energie-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EG	Europäische Gemeinschaft
EnergieStG	Energiesteuergesetz
EU	Europäische Union
EVU	Energieversorgungsunternehmen
Fa.	Firma
Geb.	Gebäude
ggf.	gegebenenfalls
GT	Gasturbinen-Heizkraftwerk
GuD	Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerk
GZF	Gleichzeitigkeitsfaktor
H <sub>2</sub> O	Wasser
HDD	Hochdruckdampf
HFC	Hydrofluorocarbon
HKW	Heizkraftwerk
HT	Hochtarif
i.d.R.	in der Regel
i.H.v.	in Höhe von
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LBO	Landesbauordnung

max.	maximal
min.	mindestens
Mio.	Millionen
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
Mrd.	Milliarden
MTU	Motoren- und Turbinen-Union
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
N <sub>2</sub> O	Distickstoffmonoxid
NGF	Nettogeschoßfläche
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
Nr.	Nummer
NT	Niedertarif
NTZ	Neue Technikzentrale
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
o.g.	oben genannte
OP	Operationsraum
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
PFC	Perfluorkohlenwasserstoffe
Prof.	Professor
S.	Seite
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SF <sub>6</sub>	Dischwefeldecafluorid
SOFC	Solid Oxid Fuel Cell
STIG	Steam Injected Gas Turbine
TA	Technische Anleitung
u.a.	unter anderem
UKJ	Universitätsklinikum Jena
VBNS	Vollbenutzungsstunden
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Begrenzte Finanzmittel der öffentlichen Hand und steigende Gesundheits-Ausgaben stellen Entwicklungen dar, welche die Krankenhauslandschaft in den letzten Jahren deutlich veränderten. Von 2411 Krankenhäusern mit 665.565 Betten im Jahr 1991 stehen heute noch 2083 Kliniken mit 503.360 Betten zur medizinischen Versorgung der Bevölkerung zur Verfügung (1). Ursächlich für die schwierige wirtschaftliche Situation der Krankenhäuser ist neben der Gesundheitsreform mit der Umstellung der Krankenhausfinanzierung auf ein pauschalierende diagnosebezogene Entgeltsystem, der Umsetzung des Arbeitszeitgesetzes für Ärzte sowie die Erhöhung der Mehrwertsteuer, auch die prekäre Energiekostenentwicklung in den letzten Jahren. Die jährlichen Ausgaben für Energie und Wasser im deutschen Gesundheitswesen belaufen sich auf aktuell 1,93 Milliarden Euro. Die durchschnittlichen Jahresenergiekosten pro Krankbett erreichen inzwischen rund 3.834 Euro. Bei gleichzeitiger Verringerung der Bettenzahl und tendenziell weiter ansteigenden Energiekosten ist eine fortwährende Erhöhung der Pro-Bett-Kosten zu erwarten.

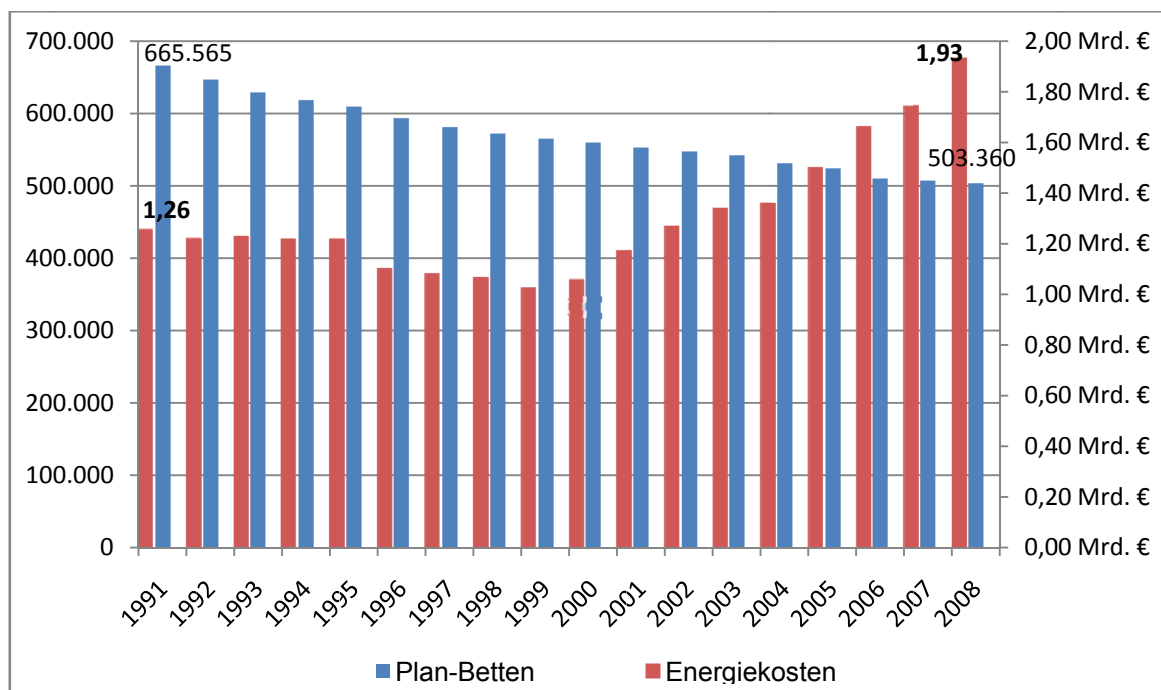


Abbildung 1: Bettenanzahl & Energiekosten Krankenhäuser in Deutschland

Der Anstieg der allgemeinen Betriebskosten im medizinischen Bereich und der wachsende Kostendruck im Gesundheitswesen zwingen Krankenhausverwaltungen heute und in Zukunft zur Ausnutzung aller Möglichkeiten der Kostensenkung, auch im Bereich der Energieversorgung. Neben den Energieeinsparmaßnahmen wie der Etablierung eines Spitzenlastmanagements, der schrittweisen Umstellung auf Energie sparende Leuchtmittel und der nachhaltig und effizienten Modernisierung der Bestandsliegenschaften bietet ein ganzheitliches Energieversorgungskonzept auf der Basis eines Energieerzeugers den größtmöglichen Kostenvorteil. Ein wirkungsvolles Element der energetischen Optimierung bietet daher innerhalb eines Energieversorgungskonzeptes die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Die Kraft-Wärme-Kopplung kombiniert in einem Prozess die Strom- und Wärmeerzeugung und verwertet so die vorhandenen Energierohstoffe optimal. Diese hoch effiziente und ausgereifte Technologie findet insbesondere ihre Anwendung in Blockheizkraftwerken (BHKW).



## 1.2 Ausgangssituation

Das traditionsreiche Universitätsklinikum Jena und der Freistaat Thüringen planen und realisieren seit 1995 ein Neubauvorhaben, welches die Zentralisierung der derzeit auf mehrere Standorte verteilten klinischen Einrichtungen am Standort Lobeda anstrebt. Dieser Klinikumsneubau mit einem Investitionsvolumen von 410 Millionen Euro und einer zu errichtenden Fläche von 161.292 m<sup>2</sup> erfolgt in zwei Bauabschnitten. Im Zuge der Planung des im Jahr 2004 fertiggestellten ersten Bauabschnitts wurde der Einsatz von Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung in Betracht gezogen. Jedoch ging man damals angesichts der bevorstehenden Liberalisierung des Energiewirtschaftsrechts von einem stark absinkenden Strompreis aus der eine Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten als nicht sinnvoll erscheinen ließ. Ein Wirtschaftlichkeitsnachweis konnte unter diesen Annahmen leider nicht erbracht werden. Mit Hinblick auf die steigenden Energiekosten und der Planung des zweiten Bauabschnittes ist ein nachhaltiges Energieversorgungskonzept zu erstellen, welches den Einsatz einer Blockheizkraftwerk-Anlage (BHKW) unter Berücksichtigung des Wirtschaftlichkeitsgrundsatzes aufzeigt.

### 1.3 Aufgabenstellung

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der technischen Auslegung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Blockheizkraftwerk-Anlagen. Anhand eines praktischen Beispiels wird der mögliche Einsatz eines BHKW für die Energieversorgung des Universitätsklinikum Jena unter technischen, wirtschaftlichen und climatechnischen Gesichtspunkten untersucht. Insbesondere ist ein Krankenhaus der Maximalversorgung für die Anwendung von Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung anhand seiner Ganzjahresverbraucher, mit den relativ hohen und konstanten Wärme- und Strombedarf geradezu prädestiniert. Ausgehend von Lastgang-Messungen des ersten Bauabschnittes und einer Energiebedarfsanalyse soll eine wirtschaftliche Optimierung der Energieversorgung durch den Einsatz eines BHKW geprüft werden. Der gleichzeitig zur Wärme erzeugte Strom soll eingengenutzt werden, wobei als Führungsgröße die Wärmegrundlastnutzung herangezogen wird. Durch die optimale Dimensionierung der Anlage soll ein hoher Deckungsanteil des Strom- und Wärmebedarfs bei größtmöglicher Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

Im Rahmen der EU-Vereinbarung zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls (2) besteht für Deutschland die Verpflichtung, die Emissionen der Treibhausgase CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC sowie SF<sub>6</sub> um 21 % bis zum Jahr 2010 zurückzuführen. Dreh- und Angelpunkt der Vereinbarung ist eine Verbesserung der Energieeffizienz und der weitere Ausbau der erneuerbaren Energien und der Kraft-Wärme-Kopplung. Um das Reduktionsziel zu erreichen, ist die Beteiligung und vor allem die Mitwirkung der öffentlichen Hand auf regionaler Ebene ein entscheidender Faktor. Blockheizkraftwerke besitzen innovative Umwandlungstechnologien, die den Schadstoffausstoß gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme erheblich reduzieren. Dies ist um so mehr von Bedeutung, wenn emissionsarme Energieträger, wie Erdgas, verwendet werden. Mit Blick auf die schleichenden Klimaveränderungen durch die Treibhausgase ist ein weiteres Ziel dieser Diplomarbeit, die mögliche Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz des ausgelegten BHKW zu ermitteln.

## 2 Erzeugungstechnologien

Die Stromerzeugung in Deutschland geschieht zu 65% mit konventionellen Kraftwerken, die mit Braunkohle, Steinkohle, Erdgas oder Erdöl betrieben werden (3). In Anbetracht des geplanten Kernenergieausstiegs und der Liberalisierung der Energiemärkte, gewinnen die fossilen Kraftwerke und die dezentrale Energieerzeugung durch Kraft-Wärme-Kopplung immer mehr an Bedeutung. Es ist daher mittelfristig davon auszugehen, dass eine stabile Stromversorgung nur im Verbund von fossilen Groß-Kraftwerken mit erneuerbaren Energien und dezentralen Kleinanlagen möglich ist. Dieses Kapitel behandelt die konventionellen sowie kraft-wärme-gekoppelten Kraftwerksarten, die auf der Nutzung fossiler Energieträger basieren und vermittelt gleichzeitig einen Überblick über die energie-technischen Grundlagen. Weiterhin wird der Weg von der getrennten zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung, das Prinzip von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen aufgezeigt.

### 2.1 Getrennte Energieerzeugung

#### 2.1.1 Kondensationskraftwerke

Ein Kondensationskraftwerk (4) ist ein Kraftwerk, in dem ausschließlich elektrischer Strom erzeugt wird. Der Prozess beginnt mit der Verbrennung von Primärenergieträger wie Kohle, Braunkohle, Öl oder Erdgas. Die dabei freigesetzte Energie wird an ein Wasserdampfsystem in der Brennkammer übertragen. Der so erzeugte Frischdampf wird anschließend über Dampfturbinen entspannt, welche an einen Stromgenerator gekoppelt sind und so die Energie in Strom umwandeln. Dieser wird in das Stromnetz eingespeist. Der entspannte Dampf wird im Kondensator kondensiert. Kühlwasser entzieht dem Dampf, der sich als Kondensat niederschlägt die Wärme, um anschließend wieder als Speisewasser für den Verdampfer zu dienen. Das aufgeheizte Kühlwasser gibt seine Wärmeenergie im Kühlturm an die Umwelt ab. Die bei der Verbrennung entstehenden Abgase werden über eine Abgasreinigungsanlage und einen Kamin ebenfalls an die Umwelt abgeführt.

### 2.1.2 Heizwerk

Konventionelle Heizwerke (4) sind Einrichtung die Wärmeenergie erzeugen. Die Brennstoffbasis für Heizwerke ist Erdgas oder wegen der Spitzenlastproblematik in Gasnetzen lagerfähiges Heizöl, Steinkohle oder Braunkohlestaub. Der Prozess startet mit dem Aufheizen von Wasser im Heizkessel oder der Erzeugung von Dampf im Dampfkessel. Die dadurch entstandene Wärmeenergie wird an in ein Fernwärmenetz oder Großverbrauchern zugeführt. Bezüglich der Technik kann zwischen Brennwärtekesseln, Niedertemperaturkesseln, Flammrohrkesseln, auch Großraumkesseln genannt, und Wasserrohrkesseln unterschieden werden. Reine Heizwerke werden heute nur noch zur Reserve- und Spitzenlastabdeckung oder für kleine Versorgungsnetze gebaut.

## 2.2 Kraft-Wärme-Kopplung

In einer Kraft-Wärme-Kopplung wird die Abwärme, die bei der Erzeugung von mechanischer Energie in elektrischer Energie entsteht und sonst durchweg ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird, nutzbar gemacht (5). Das bedeutet im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme, dass Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung durch die gleichzeitige Nutzung der Abwärme einen höheren Gesamtnutzungsgrad erreichen und damit den Brennstoffeinsatz und die Emissionen entscheidend reduzieren. Bei richtiger Auslegung und optimalen Betrieb einer KWK-Anlage lässt sich etwa ein Drittel der Primärenergie einsparen, die für die getrennte Erzeugung der elektrischen und der thermischen Nutzenergie aufzuwenden wäre. Abbildung 2 soll den Unterschied zwischen getrennter und gekoppelter Erzeugung veranschaulichen. Bei der getrennten Energieerzeugung werden beim Kondensationskraftwerk am gewählten Beispiel von 100 % Primärenergie nur 34 % in nutzbare Stromenergie umgewandelt, ca. 64% Prozent der thermischen Prozessenergie gehen verloren. Der Heizkessel mit einem Wirkungsgrad von 90 % benötigt zusätzlich zur Erzeugung einer Wärmeenergie von 56 % noch 62 % Brennstoffeinsatz. Für die gekoppelte Erzeugung werden ressourcenschonend statt (100% + 64%) nur noch 100% Brennstoff zur Deckung des Energiebedarfs von 56% Wärme und 34% Strom eingesetzt. Der Brennstoffausnutzungsgrad liegt bei der Kraft-Wärme-Kopplung im betrachteten Fall um 38

% höher als bei der getrennten Erzeugung. Gesamtnutzungsgrade von bis zu 90% sind somit, je nach Art der Anlage erreichbar.

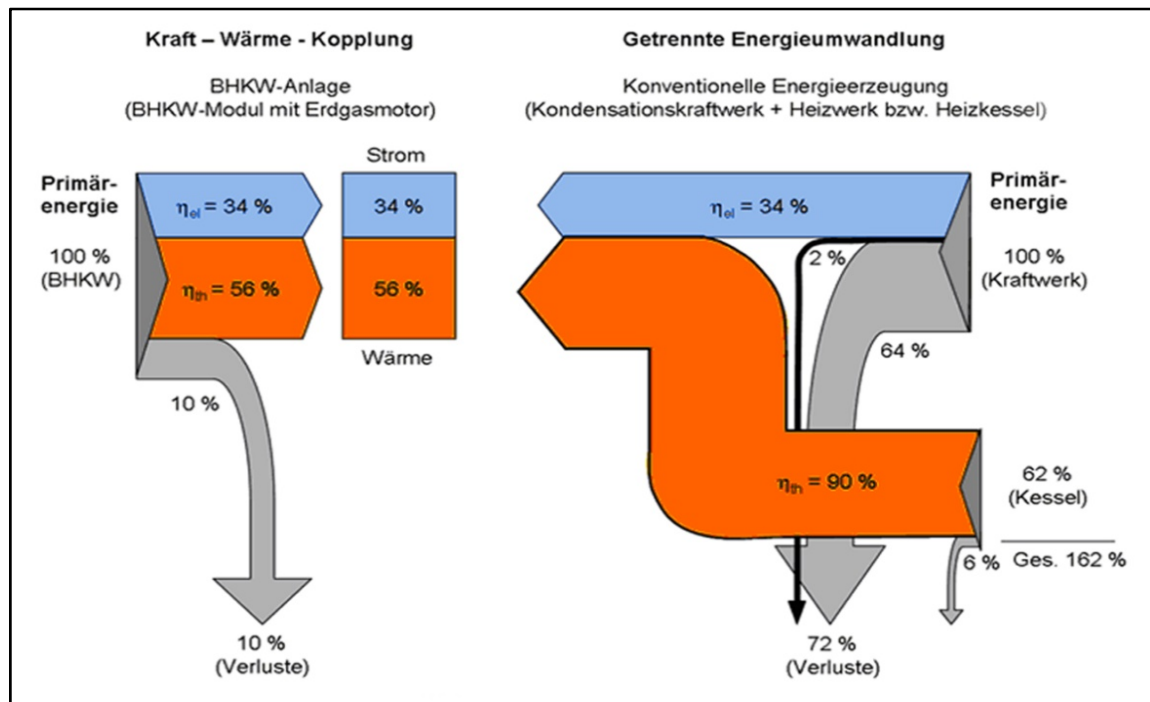


Abbildung 2: Primärenergieeinsparung der Kraft-Wärme-Kopplung (6)

Beachtet werden muss dabei allerdings, dass dieser Vorteil sich nur ausnutzen lässt, wenn Wärme und Strom zeitgleich nachgefragt werden, da ansonsten die Wirkungsgrade von KWK-Anlagen sich erheblich verschlechtern. Die Sicherstellung der permanenten Wärmeabnahme ist besonders schwierig, wenn aus technischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen die Kraftwerke sich in außer städtischen Regionen befinden. Die Abwärme fällt in riesigen Mengen konzentriert am Kraftwerksstandort an, wobei dort in der Regel zu wenige oder gar keine Verbraucher für diese Wärme vorhanden sind. Während elektrische Energie durch Hochspannungsleitungen auch über weite Distanzen relativ einfach und mit hohem Wirkungsgrad zum Verbraucher transportiert werden kann, ist dies bei dem Transport der Abwärme über Fernwärmeleitungen nur begrenzt möglich. Die Fachliteratur gibt einen wirtschaftlichen Betrieb in einem Umkreis von 10 bis 15 km (7) um das Kraftwerk an. Des Weiteren ist der Aufbau eines geeigneten Fernleitungsnetzes mit zugehöriger Infrastruktur aufwendig und mit erheblichen Investitionen verbunden. So beschränkt sich die Abwärmenutzung auf einige wenige Fernwärmegebiete und wenige industrielle Abwärmenutzer in unmittelbarer Nachbarschaft der Kraftwerke.

### 2.2.1 Physikalische Grundlagen

„Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die gleichzeitige Gewinnung von mechanischer und thermischer Nutzenergie aus anderen Energieformen mittels eines thermodynamischen Prozesses in einer technischen Anlage.“ (5)

Physikalisch vereinfacht beschrieben ist der thermodynamische Prozess eine Anwendung von Erkenntnissen aus der Wärmelehre - Thermodynamik, der Gasgesetze und der Strömungsmechanik. Auch im Kraftwerksprozess (8) gilt sowohl der 1. Hauptsatz der Thermodynamik, bei der Umwandlung von einer Energieform in eine andere geht keine Energie verloren, als auch der 2. Hauptsatz der Thermodynamik, die Primärenergie lässt sich nicht vollständig in mechanische Energie (Strom) umwandeln. Der Teil, der sich in Kraft umwandeln lässt, wird physikalisch Exergie genannt, der nicht umwandelbare Teil Anergie. Im Kraftwerksprozess sind für die Steigerung der Exergie Temperatur und Druck wichtige Größen. Bei der Umwandlung von Wärme in Kraft benötigt man je ein Reservoir mit hoher Temperatur und eins mit niedriger Temperatur. Je größer die Temperaturdifferenz ist, desto effizienter läuft der Prozess ab. Die Effizienz und somit der Wirkungsgrad der Kraftwerke lässt sich nicht beliebig steigern. Er ist physikalisch durch den carnot'schen Wirkungsgrad begrenzt. Ursächlich dafür ist, dass Wärme nur zum Teil aus Exergie besteht.

Diese Prozesse, bei denen nach einer Reihe von Zustandsänderungen eines Gases der ursprüngliche Ausgangszustand wieder erreicht wird, heißen Kreisprozesse. Gelangt der Prozess vom Anfangszustand 1 zu einem von diesem verschiedenen Zustand 2 auf einem anderen Weg als vom Zustand 2 wieder zurück zum Zustand 1, so wird Wärme in Arbeit umgewandelt. Im pV-Diagramm ergibt sich für einen Kreisprozess ein geschlossener Kurvenzug. Die Flächen unter den beiden Kurven entsprechen den verrichteten Arbeiten. Der Inhalt der umschlossenen Fläche entspricht der abgegebenen Arbeit. Der linksläufige Kreisprozess nimmt unter Zufuhr der Arbeit die Wärme  $q_{zu}$  auf und gibt die Wärme  $q_{ab}$  bei höheren Temperaturen ab. Kältemaschinen und Wärmepumpen arbeiten nach linksläufigen Kreisprozessen. Der rechtsläufige Kreisprozess nach Abbildung 2 liefert die Arbeit und die Wärme  $q_{ab}$  als Heiz- oder Prozesswärme.

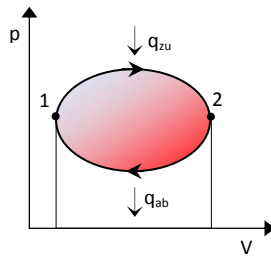


Abbildung 3: Rechtsläufiger Kreisprozess, Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie  $q \rightarrow w$

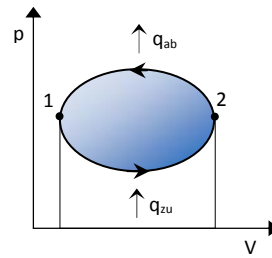


Abbildung 4: Linksläufiger Kreisprozess, Umwandlung von mechanischer Energie in Wärmeenergie  $w \rightarrow q$

Wie bereits in den vorangegangenen Anschnitt erwähnt ist der größtmögliche Wirkungsgrad den Wärmekraftmaschinen theoretisch erreichen können der carnotische Wirkungsgrad. Dieser gibt an, welcher Anteil der zugeführten Wärme maximal in mechanische Arbeit umgewandelt werden. Weiterhin wird der Carnot-Kreisprozess als thermodynamisches Modell verstanden und dient als Vergleichsprozess zur Beurteilung anderer Kreisprozesse (16).

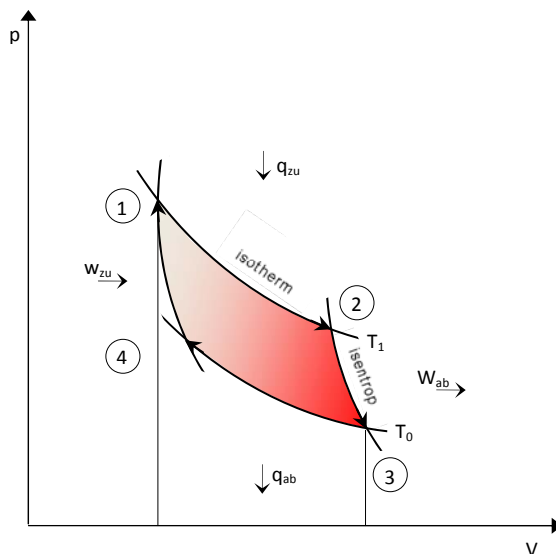


Abbildung 5: Ablauf des Carnot-Kreisprozesses im pV-Diagramm

Dieser rechts läufige Carnot-Kreisprozess besteht formal aus vier Einzelschritten:

1. isotherme Wärmezufuhr (Expansion) (1→ 2) bei gleichzeitiger Entspannung mit Angabe von technischer Arbeit

2. isentroper (adiabate) Druckabbau ( $2 \rightarrow 3$ ) mit Abgabe von technischer Arbeit
3. isotherme Wärmeabfuhr ( $3 \rightarrow 4$ )
4. isentrope Druckerhöhung ( $4 \rightarrow 1$ ).

Die Fläche zwischen dem Kurvenstück  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$  und der Abszisse entspricht der bei der Expansion verrichteten mechanischen Arbeit. Dagegen kommt der Fläche unter der Kurve  $3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$  die bei der Kompression zugeführte mechanische Arbeit gleich. Die Differenz beider Flächen gibt die während eines vollen Kreislaufs insgesamt abgegebene mechanische Arbeit an. Folglich muss die bei  $1 \rightarrow 2$  zugeführte Wärme  $q_{zu}$  größer sein, als die bei  $3 \rightarrow 4$  abgegebene Wärme  $q_{ab}$ . Der Überschuss an abgegebener Wärme  $q_{ab}$  über die aufgenommene Wärme  $q_{zu}$  ist die nutzbare Arbeit  $w_{nutz}$ :

$$W_{Nutz} = Q_{zu} - Q_{ab}$$

Da die Wärme als  $Q = m \cdot c \cdot T$  beschrieben werden kann, ergibt sich der Carnot-Wirkungsgrad  $\eta_c$  zu:

$$\eta_c = \frac{W_{Nutz}}{Q_{zu}} = \frac{Q_{zu} - Q_{ab}}{Q_{zu}} = \frac{T - T_0}{T} = 1 - \frac{T_0}{T}$$

Anhand der Kenndaten eines Kohlekraftwerks wird nachstehend die Bedeutung des Wirkungsgrades dargestellt. In einem Kohlekraftwerk, mit der Temperatur des überhitzten Dampfes von  $540^\circ\text{C}$  (813K) und einer Kondensationstemperatur von  $27^\circ\text{C}$  (300K) ergibt sich ein carnotischer Wirkungsgrad von  $\eta_c = 0,63$ . Die unter diesen Bedingungen zugeführte Wärme besitzt also Exergie in der Größe von 63%, die restlichen 37% sind nicht arbeitsfähige Anergie. Der tatsächliche thermische Wirkungsgrad der ausgeführten Anlagen liegt jedoch nur bei  $\eta_{th} \leq 0,45\%$ .

$$\eta_c = 1 - \frac{T_0}{T} = 1 - \frac{300 \text{ K}}{813 \text{ K}} = 63\%$$



Die Abweichungen zwischen dem maximalen und dem realen Wirkungsgrad resultieren aus der Summe aller hintereinandergeschalteten Energieumwandlungsverluste. Im Realfall kann der Brennstoff in der Brennkammer seinen Energieinhalt mit einem Kesselwirkungsgrad von  $\eta_K \approx 0,95$  an das Speisewasser abgeben. Der thermische Wirkungsgrad des Wasser-Dampf-Kreislaufs beträgt nur  $\eta_{th} \approx 0,5$ , wofür im Wesentlichen die hohe Verlustwärme des Kondensators verantwortlich ist. Für den Wirkungsgrad sämtlicher Dampf- und Wasserleitungen kann  $\eta_L \approx 0,98$  und für die Turbine  $\eta_T \approx 0,87$  angenommen werden. Der Synchrongenerator hat relativ geringe Verluste mit  $\eta_G \approx 0,98$ . Schließlich muss man noch den Eigenbedarf des Kraftwerks berücksichtigen. Dieser entsteht z.B. für die zahlreichen Motoren, Pumpen, Lüfter und Fördereinrichtungen und wird durch den Eigenbedarfsfaktor  $\varepsilon = 0,06$  einkalkuliert. Mit diesen wichtigsten Teilwirkungsgraden erhält man den Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{Ges}$ :

$$\eta_{Ges} = \eta_K \cdot \eta_{th} \cdot \eta_L \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot (1 - \varepsilon) \approx 37\%$$

Für die Ganzheitliche Beurteilung von Energieerzeugungsanlagen sind weitere wichtige Kennzahlen wichtig.

### 2.3 Gekoppelte Energieerzeugung

Die Energieerzeugungsanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung werden in der Fachliteratur (4) in zwei Untergruppen unterscheiden. Zum einen in Heizkraftwerke (HKW) und zum anderen in Blockheizkraftwerke. KWK-Anlagen zur zentralen Energieversorgung, mit Strom und Wärme von Industriebetrieben und Stadtteilen werden als Heizkraftwerke (HKW) bezeichnet. Blockheizkraftwerke (BHKW) sind dezentrale Energieversorgungsanlagen, die größere Wohn-, Gewerbe- und öffentliche Gebäude, bis zu einer Modulleistung von 10 MW<sub>el</sub> mit Strom und Wärme versorgen. Im Weiteren Verlauf der Arbeit werden jene Kraftwerksarten beschrieben die den heutigen Stand der Technik widerspiegeln und insbesondere für den Einsatz im Universitätsklinikum Jena in Erwägung gezogen werden. Maßgeblich sind das Blockheizkraftwerke auf Basis von Verbrennungsmotoren, Mikrogasturbinen, Stirling-Motoren und Brennstoffzellen die detailliert in separaten Unterkapiteln behandelt werden.

#### 2.3.1 Heizkraftwerk

##### 2.3.1.1 Dampfturbinen-Heizkraftwerk (DT)

Dampfturbinen-Heizkraftwerke (9) kommen überwiegend im industriellen Bereich zum Einsatz, wo ein ganzjähriger und weitgehend kontinuierlicher Bedarf an Nutzwärme und Strom besteht. Nach der Aufbereitung und der anschließenden Verfeuerung von fossilen Energieträgern wird im Dampfkessel durch die frei werdende Wärme aus Wasser Wasserdampf von hoher Temperatur (500°C - 650°C) und hohem Druck erzeugt. Der Wasserdampf treibt eine oder mehrere hintereinander angeordnete Turbinen an, die jeweils auf Hochdruck-, Mitteldruck- oder Niederdruckdampf ausgelegt sind. Der an die Turbinen angekuppelte Generator wandelt Teile der thermischen Energie in mechanische und elektrische Energie um. Der entspannte Dampf wird anschließend im Kondensator niedergeschlagen und als Wasser mittels der Speisewasserpumpe erneut dem Kessel zugeführt. Das Wasser durchläuft einen Kreisprozess bei dem das Wasser immer wieder unter Zufuhr von mechanischer Energie in einer Pumpe verdichtet, unter Zufuhr von Wärmeenergie erhitzt und verdampft, unter Abgabe von mechanischer Ener-

gie entspannt und unter Abgabe von Wärmeenergie gekühlt und wieder zu Wasser kondensiert.

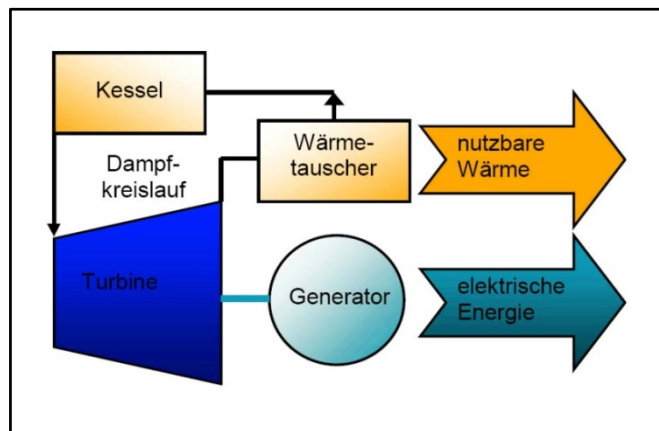


Abbildung 6: Dampfturbinenprozess

Nach betrieblichen Erfordernissen wird das Dampfturbinen-Heizkraftwerk in zwei Anlagenvarianten unterschieden:

### **Gegendruckanlagen**

Bei Gegendruckanlagen verfügt der Dampf am Turbinenaustritt noch über genügend hohe Temperatur, um diesen für Wärmeanwendungen nutzbar zu machen. Dazu wird der Dampf nicht völlig entspannt, sondern bei einigen Bar „Gegendruck“ gehalten. Damit wird allerdings die Turbinenleistung vermindert. Der Abdampf der Turbine wird einem Wärmetauscher zugeführt, dem so genannten Heizkondensator, der über ein Fernwärme-Rohrsystem mit den Verbrauchern verbunden ist. Strom- und Wärmeerzeugung sind meist starr miteinander gekoppelt. Wird mehr Wärme benötigt, muss der Dampfstrom durch die Turbine erhöht werden und somit wird gleichzeitig mehr Strom generiert.

### **Entnahme-Kondensationsanlagen**

In einer Entnahmekondensationsanlage wird ein Teilstrom des Dampfes aus der Turbine als Nutzdampf entnommen, ein anderer Teilstrom in einen Kondensator geführt, der mit Kühlwasser oder durch Nutzwärmeabgabe abgekühlt wird. Mit steigender Wärmeauskopplung nimmt die Stromerzeugung erheblich ab, wenn nicht die Wärmeleistung des Dampferzeugers entsprechend gesteigert wird. Die Strom- und Wärmeerzeugung ist weitgehend unabhängig voneinander.

### 2.3.1.2 Gasturbinen-Heizkraftwerk (GT)

Gasturbinen-Heizkraftwerke (9) werden hauptsächlich im Bereich der Industrie zur Bereitstellung von Niedertemperatur-Prozesswärme (bis 500°C) und Nutzwärme eingesetzt. Der unter Druck stehende hochleichte Brennstoff (Erdgas oder extraleichtes Heizöl) strömt zusammen mit der vom Verdichter kommenden Verbrennungsluft in die Brennkammer, in der ein homogenes Gas-/Luftgemisch entsteht. Die durch die Verbrennung entstehende Temperaturerhöhung (ca. 1.200°C - 1.500°C) vergrößert das Volumen und somit die Strömungsgeschwindigkeit der Verbrennungsgase. Die heißen Abgase strömen anschließend in die Gasturbine, die analog einer Dampfturbine arbeitet. Die Turbine treibt sowohl einen Generator an, als auch den Verdichter, der zur Kompression der Luft etwa 2/3 der Turbinenleistung benötigt. Die noch heißen Abgase werden in den Abhitzekessel geleitet und dort mit einer Zusatzfeuerung kombiniert. Diese werden zur Dampferzeugung, ggf. direkt für Prozesszwecke, Absorptionskälteanlagen und/oder zur Nutzwärmeabgabe verwendet.

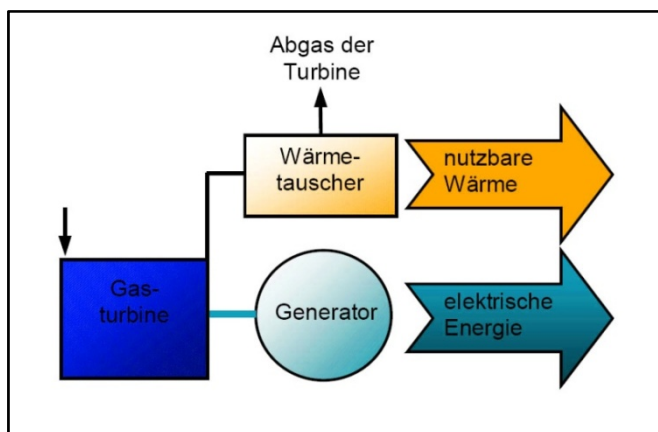


Abbildung 7: Dampfturbinenprozess

Eine weiterentwickelte Variante des Gasturbinenprozesses ist der Cheng-Cycle-Prozess oder STIG-Prozess. Im Unterschied zu dem einfachen Gasturbinenprozess der eine starre Kopplung zwischen Strom- und Wärmeproduktion erzwingt, kann beim Cheng-Cycle-Prozess ein Teil des erzeugten Dampfes (theoretisch 0-100%) in die Brennkammer und in die Turbine eingespeist werden. Der durch die Dampfzugabe höhere Massenstrom in der Turbine sorgt für eine Leistungssteigerung, und durch die Wärmerückgewinnung wird der Wirkungsgrad der Gasturbine verbessert. Dies erlaubt auch eine variable Anpassung an den benötigten Wär-

mebedarf, da je nach Anforderung die Restwärme zur Erhöhung der elektrischen Leistung oder zur Bereitstellung von Prozesswärme genutzt werden kann.

### 2.3.1.3 Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerk (GuD)

Ein Gas- und Dampf-Kraftwerk (GuD-Kraftwerk) (9) ist die Kombination aus einer oder mehreren Gasturbinen mit einer oder mehreren Dampfturbinen. Durch die Kombination der Anlagen werden die Vorteile beider Prozesse und zwar die hohen Temperaturen der Gasturbine und die positiven Eigenschaften des Wasserdampfes als Wärmeträger miteinander verbunden. In solch einer Anlage werden die Gasturbinen-Abgase von 400°C bis 600°C in einem Abhitzekeessel mit oder ohne Zusatzfeuerung zur Erzeugung von Frischdampf mit 40bar bis 80bar / 350°C bis 540°C für die Dampfturbine verwendet. Die Wärme kann dem Gasturbinen-Abgas entnommen werden oder der Dampfturbine nach dem Gegendruck- oder Entnahmeprinzip. Gas- und Dampfturbine treiben auch hier jeweils Generatoren an. An die Dampfturbine schließen sich ein oder mehrere Wärmeübertrager sowie Prozessdampf- und Nutzwärmeabnehmer an. Ist größtmögliche Flexibilität gefordert, wird ein GuD nicht als Kombinationskraftwerk sondern als Verbundkraftwerk mit mehrfacher Wärmeauskopplung betrieben. Hierbei können Dampf- und Gasturbinenbetrieb jeweils mit Wärmeauskopplungen unabhängig voneinander gefahren werden, so dass auf Wärme- und Stromnachfrage flexibel reagiert werden kann.

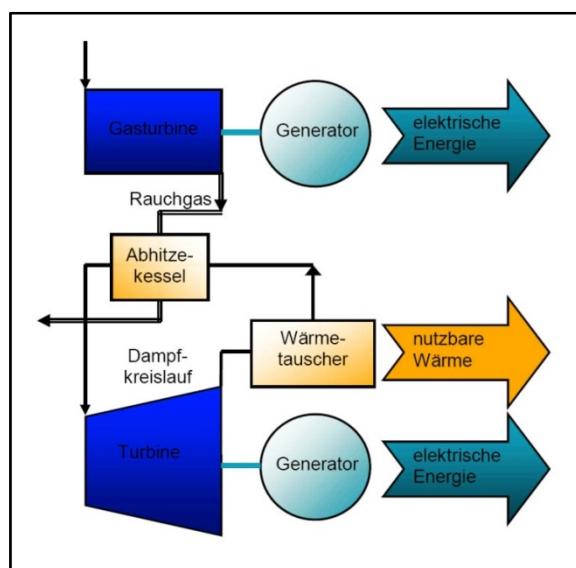


Abbildung 8: GUD-Prozess

### **3 Block-Heizkraftwerk (BHKW)**

In diesem Kapitel wird zunächst der Begriff BHKW näher erläutert und hinsichtlich ihrer Leistungsklassen erfolgt eine Abgrenzung zu zentralen KWK-Anlagen. Des Weiteren werden die verschiedenen BHKW-Technologien im Hinblick auf die mögliche Anwendung im Universitätsklinikum Jena detaillierter als die zuvor genannten Erzeugungstechnologien beschrieben. Dabei finden sowohl etablierte Anlagenkonzepte als auch innovative Entwicklungen, die sich noch auf dem Weg zur Marktreife befinden, Beachtung. Zentrale Punkte sind die wesentlichen Anlagenkomponenten und die Integration in die Wärmeversorgung.

#### **3.1 Begriffsbestimmung**

Auf dem Weg von der zentralen Energieerzeugung zur dezentralen waren viel technische Innovationen notwendig. Die mittels KWK in Heizkraftwerken erzeugte Wärme konnte zuvor nur für einige wenige Fernwärmegebiete und wenige industrielle Abwärmenutzer in unmittelbarer Umgebung der Kraftwerke bereitgestellt werden. Dennoch war es Ziel die Wohn- und Industriegebiete die aus geografischen Gründen nicht an ein Fernwärmenetz angeschlossen sind und üblicherweise zentral über Hochspannungsleitungen mit Strom versorgt werden sowie vor Ort ihre Wärme selbst z.B. durch erdgas- oder heizölbetriebene Kessel erzeugen eine effiziente gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung zu ermöglichen. Kleinere dezentral in der Nähe der Verbraucher errichtete KWK-Anlagen, die in ihrer Größe an die Abnahmekapazität der Wärme- bzw. Stromverbraucher angepasst sind wurden entwickelt. Diese dezentralen Heizkraftwerke (HKW) waren namensgebend für die so genannten Blockheizkraftwerke (7). Im Weiteren BHKW genannt. Neben den vorrangigen Vorteilen der Kraft-Wärme-Kopplung waren die wirtschaftlichen Gesichtspunkte wie die Verringerung der Übertragungsverluste der Fernwärmenetze, der hohe Gesamtnutzungsgrad von bis zu 90% und damit verbundene Reduzierung des Primärenergieverbrauches und der Emissionen für den Einsatz eines BHKW entscheidend.

BHKW sind laut Definition kompakte, anschlussfertige Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen auf Basis von Verbrennungsmotoren (7). Blockheizkraftwerke im Sinne der VDI-Richtlinie 3985 „Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Verbrennungskraftmaschinen“ (18) sind Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen, die gleichzeitig Strom und nutzbare Wärme erzeugen. In den letzten Jahren wurde der Begriff des BHKW jedoch noch weiter gefasst. Als BHKW werden zu den Anlagen mit Verbrennungsmotoren auch solche mit Mikrogasturbinen, Stirling-Motoren, Dampfkraftmaschinen und Brennstoffzellen gezählt.

Der Leistungsbereich der BHKW beginnt bei einigen kW<sub>el</sub> und endet für einzelne Module unterhalb 10 MW<sub>el</sub>. Größere Leistungen können durch das Zusammenschalten von mehreren Modulen erreicht werden oder durch den Einsatz einer Gasturbine ab 1 MW<sub>el</sub>. Hinsichtlich der Abgrenzung der Leistungsklassen für Blockheizkraftwerke gibt es keine einheitliche Regelung. Daher sollen nachstehend zwei mögliche Einteilungen aufgezeigt werden.

Die EU-Richtlinie 2004/8/EG enthält über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt (10) eine zweistufige Unterteilung in

- KWK-Kleinstanlage  $\leq 500 \text{ kW}_{el}$  und in
- KWK-Kleinanlagen  $\geq 1000 \text{ kW}_{el}$ .

Eine aussagekräftigere Einteilung in Leistungsbereiche wird jedoch in der Broschüre „Kleine Kraft-Wärmekopplung für den Klimaschutz“ des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (11) beschrieben.

- Mikro-KWK:  $\leq 15 \text{ kW}_{el}$  (Micro-BHKW oder Mini-BHKW)
- Kleinst-KWK:  $\geq 50 \text{ kW}_{el}$  (Kleinst-BHKW)
- Klein-KWK:  $\leq 2000 \text{ kW}_{el}$  (Klein-BHKW)
- Groß-KWK  $> 2000 \text{ kW}_{el}$  (Groß-BHKW)

## 3.2 Einsatzmöglichkeiten und allgemeine Funktionsweise eines BHKW

### 3.2.1 Einsatzmöglichkeiten eines BHKW

Wie zuvor beschrieben kommen BHKW auf Grund ihrer kleineren Leistungsgrößen verstärkt für die verbrauchernahe Erzeugung von Strom und Wärme zum Einsatz. Abhängig von den gegebenen Rahmenbedingungen sind typische Anwendungsfelder für Mikro- und Kleinst-BHKW der Einsatz in Mehrfamilien- und Reihenhäusern, Hotels, Pensionen, Herbergen. Die Baugrößen variieren von einer größeren Waschmaschine bis hin zu der einer mittleren Heizkessel-Anlage. Freizeitbädern, Kläranlagen, Sporteinrichtungen, Krankenhäuser und öffentliche Einrichtungen mit ihren sehr guten Bedingungen, durch ihre ganzjährige thermische Grundlasten und hohen Strombedarf, eignen sich besonders für Klein-BHKW. Die meist schlüsselfertigen Komplettanlagen werden sowohl in Containerbauweise als auch beim Hersteller fertig montiert als komplette Einheit mit Motor, Generator, Wärmetauscher und Schaltschrank angeboten. Groß-BHKW mit einer elektrischen Leistung von 2 MW und mehr und finden ihre Anwendung in der Versorgung von Nah- und Fernwärmenetzen, in der Industrie für die Bereitstellung von Prozesswärme und Kälte sowie in Krankenhäusern der Maximalversorgung.

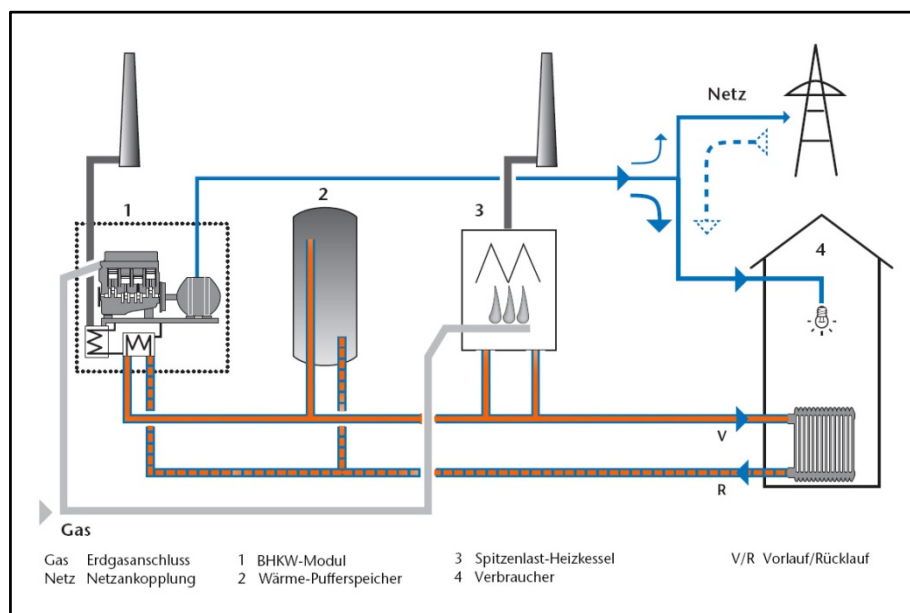


Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau eines BHKW



### 3.2.2 Allgemeine Funktionsweise eines BHKW

Blockheizkraftwerke bestehen im Wesentlichen aus einer Antriebsmaschine, einem Generator und Wärmeübertragern (14). Der Generator wandelt die an der Antriebswelle erzeugte mechanische Arbeit in elektrische Energie um. Die erzeugte elektrische Energie wird vorrangig selbst genutzt oder in das Netz des örtlichen Energieversorgungsunternehmens eingespeist. Eine weitere Möglichkeit ist auch eine starre Kupplung der Antriebsmaschine mit einem Verdichter für die Druckluftherzeugung. Die anfallende Wärmeenergie aus Antriebsmaschine, Generator und Abgasen werden über spezielle Wärmetauscher durch gleichzeitiges aufheizen des sekundärseitig fließenden Heizungswassers abgeführt. Hohe Abgastemperaturen von bis zu 600 °C wie bei Gasturbinen ermöglichen nicht nur die Bereitstellung von Niedertemperatur-Heizwasser sondern können auch zur Dampferzeugung (Prozesswärme) genutzt werden. Bei großem Wärmebedarf der Versorgungsobjekte können zur besseren Anpassung an die Lastverhältnisse mehrere Module parallel betrieben werden. Dieser modulare Aufbau erlaubt es, dass einzelne Anlagen im günstigen Wirkungsgradbereich unter Volllast laufen oder bei geringem Leistungsbedarf abgeschaltet werden können. Ein weiterer Vorteil ist die gute Durchführbarkeit von Wartungs- und Reparaturarbeiten an diesen Anlagen. Weitere Bestandteile eines BHKW sind der Spitzenlastkessel und der Pufferspeicher. In Anbetracht dass ein BHKW aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nur für die Grundlast der Verbraucher ausgelegt ist, ist ein Spitzenlastkessel für die an kalten Tagen erforderliche höhere Wärmeleistung mit vorzuhalten. In Krankenhäusern, wird der Spitzenlastkessel auf die maximale Wärmelast ausgelegt, damit die Wärmeversorgung bei Ausfall des BHKW sichergestellt ist. Ein Pufferspeicher dient als Wärmepuffer zwischen dem Zeitpunkt der Erzeugung und der Wärmenutzung. Durch eine optimale Dimensionierung des Pufferspeichers lassen sich die Anzahl der Starts des BHKW reduzieren und so die Lebensdauer des BHKW verlängern.

### 3.3 Brennstoffe

Unter Berücksichtigung der Antriebstechnologie und des Entwicklungsstandes sind verschiedene Brennstoffe für den Einsatz in BHKW geeignet.

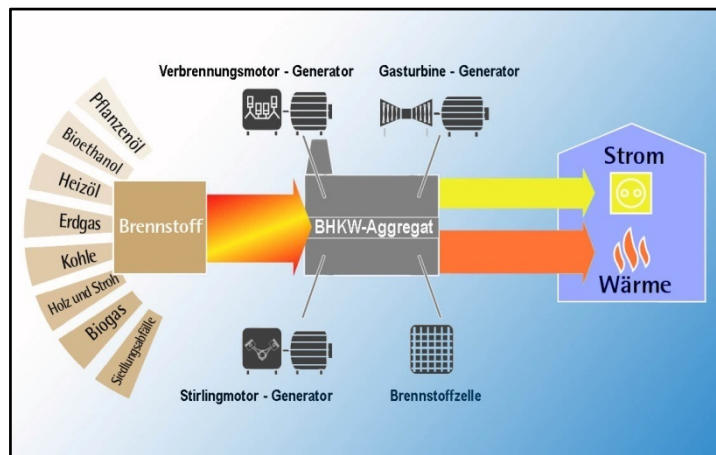


Abbildung 10: KWK-Prinzip & Brennstoffe (12)

#### 3.3.1 Fossile Energieträger

##### Erdgas

Auf Grund von ökologischen Vorteilen, wie den geringen Verbrennungsemissionen und einem gut ausgebauten Verteilungsnetz (13), findet Erdgas als fossiler Brennstoff die häufigste Anwendung in BHKW. Die bei der Verbrennung von Erdgas entstehenden Abgase sind nahezu ruß- und geruchlos. Des Weiteren sind die Abgase beinahe frei von Schwefeldioxid, Schwermetallen und Halogenverbindungen. Durch den geringen Anteil an Kohlenstoff und den hohen Wasserstoffgehalt besitzt Erdgas im Vergleich zu anderen fossilen Energieträgern die günstigste Kohlendioxid-Bilanz. Bezogen auf den gleichen Energieinhalt erzeugt die Verbrennung von Erdgas etwa 40 – 50 % weniger Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) als die Verbrennung von Kohle und 25 % weniger Kohlendioxid als die Verbrennung von Heizöl.

##### Flüssiggas

Flüssiggase sind durch Kühlung und Kompression verflüssigte Gase die sich ebenfalls im Vergleich zu anderen fossilen Brennstoffen durch geringe Verbrennungsrückstände auszeichnen. Der Brennstoff in Form eines Flüssiggasgemis-

ches aus Propan und Butan findet hauptsächlich dort seine Anwendung wo kein Erdgasanschluss auf einer Liegenschaft vorhanden ist und die ökonomischen und ökologischen Vorteile von Gas-BHKW genutzt werden möchten.

### **Diesel, Heizöl**

Diesel beziehungsweise Heizöl EL wird vor allem bei motorischen BHKW eingesetzt. Heizöl eignet sich insbesondere dort, wo bereits eine Infrastruktur zur Lagerung vorhanden ist, allerdings weist es schlechtere Emissionswerte als Erdgas auf. Sind keine Lagerstätten vorhanden so müssen Maßnahmen für die Brennstofflagerung und weiterer Platzbedarf eingerechnet werden, was sich nachteilig auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage auswirkt. Neben der vorteilhaften hohen Stromkennzahl von Heizöl-Dieselmotor-BHKW-Anlagen sind diese auch uneingeschränkt für die Notstromversorgung in z.B. Krankenhäuser, Hotels, Flughäfen, Kaufhäuser, Sprinkleranlagen prädestiniert.

## **3.3.2 Regenerative Energieträger**

### **Pflanzenöl**

Durch die Photosynthese wandeln Ölpflanzen wie die Raps-, Soja-, Sonnenblumen-, Erdnuss- und Palmenpflanze die Sonnenenergie in Öl um, das annähernd eine Energiedichte von Diesel-Kraftstoff aufweist. Ausgehend von der steuerlichen Begünstigung, der Vergütung durch die KWK-Gesetz-Novellierung 2009 und einer gesicherten Kraftstoffqualität wird raffiniertes Pflanzenöl flächendeckend sowie umweltverträglich in BHKW eingesetzt. Die Qualitätsanforderungen sind in der DIN-Vornorm, DIN V 51605 „Kraftstoffe für pflanzenöltaugliche Motoren – Rapsölkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren“ definiert. Die spezifischen Eigenschaften von Pflanzenöl im Vergleich zu Diesel bzw. Heizöl erfordern für ein BHKW angepasste Anlagenkomponenten. Daher müssen die wesentlichen Besonderheiten beim Einsatz von Pflanzenöl in Blockheizkraftwerken, die spezifischen Anforderungen an die Kraftstofflagerung, Kraftstoffzuführung an den Motor und an den Motor selbst zwingend berücksichtigt werden (14).

## **Biodiesel**

Als Ausgangsstoff für Biodiesel dient Pflanzenöl. Durch den Prozess der Umesterung wird daraus unter Zugabe von Methanol und eines Katalysators Biodiesel gewonnen. Als Nebenprodukt entsteht Glyzerin, das als Industrierohstoff genutzt werden kann. Biodiesel, zu dessen Produktion groß teils Rapsöl verwendet wird, weist weitgehend die Eigenschaften von Dieselkraftstoff auf. Er besitzt ebenfalls eine hohe Umweltverträglichkeit auf Grund von schneller biologischer Abbaubarkeit und geringer Ökotoxizität. Beim Einsatz von Biodiesel muss gewährleistet sein, dass Gummiteile und Dichtungsmaterialien Biodiesel tauglich sind, da sie gegenüber Biodiesel manchmal nicht ausreichend beständig sind.

## **Feste Biomasse**

Feste Biomasse kann als Hackschnitzel, Sägespäne oder Pflanzenresten in Blockheizkraftwerken eingesetzt werden. Die Biomasse wird in einem Biomassekessel verbrannt so dass ein heißes Rauchgas entsteht welches im weiteren Verlauf eine Turbine oder Dampfkolben antreibt.

## **Holzgas**

Aus Holzabfällen werden durch eine verfahrenstechnische chemische Reaktion, der Pyrolyse einer unterstöchiometrische Verbrennung unter anderem das brennbare Holzgas gewonnen und kann in BHKW mit Gasmotoren oder Gasturbinen genutzt werden. 1 kg Holz benötigt beim Verbrennen  $4,3 \text{ m}^3$  Luft; dabei entstehen  $5,6 \text{ m}^3$  brennbares Gas (15). Das aus der Vergasung gewonnene Brenngas muss für den Einsatz in Verbrennungskraftmaschinen gekühlt und gereinigt werden. Für die Eignung zur direkten Nutzung in nachgeschalteten Gasmotoren stellen vor allem die Partikel- (anorganische Asche) und Teergehalte des Produktgases das Hauptproblem dar. Daher ist eine Reinigung des Gases erforderlich. Technologisch und wirtschaftlich vertretbare Verfahren zur Gasreinigung, sowie die Abwässer, die bei der Gasreinigung bzw. durch die Verbrennung des Produktgases anfallen sind nicht marktreif. Des Weiteren kann zur Erreichung einer langen Nutzungsdauer des Motors bzw. Turbine eine durchgängige optimale Holzgasqualität nicht immer sichergestellt werden

### Biogas, Klärgas, Deponiegas

Biogas, Klärgas und Deponiegas sind Gasgemische aus Methan, Kohlendioxid und Spurengasen, das aus gezielter Umwandlung bzw. Vergärung von organischem Material, unter Luft- und Lichtausschluss und bei ausreichenden Temperaturen, mit Hilfe von Mikroorganismen gewonnen werden können.

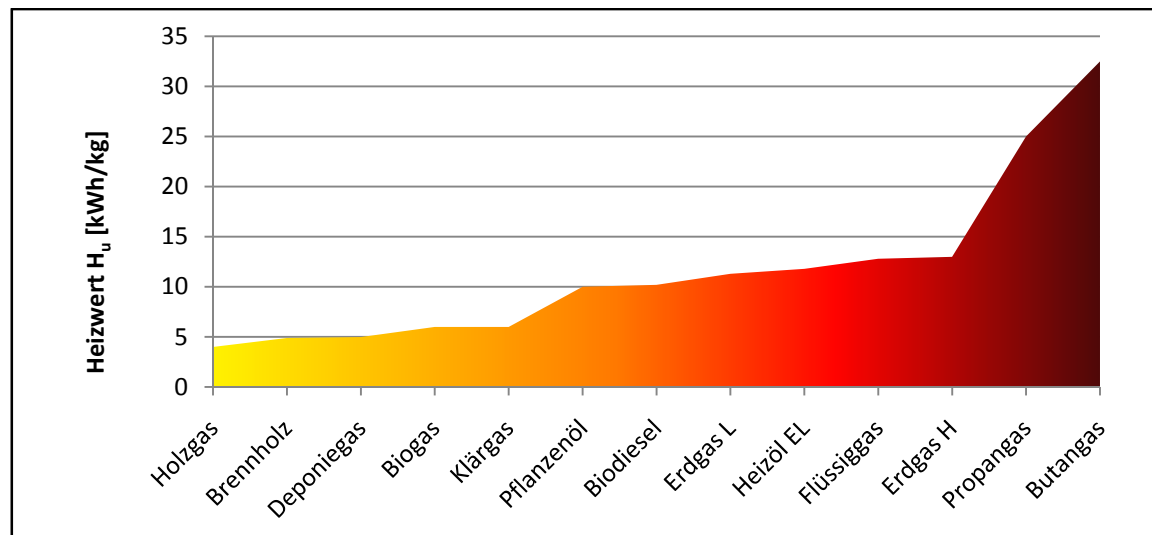


Abbildung 11: Energiegehalt Gasarten

### 3.4 BHKW-Technologien

#### 3.4.1 Verbrennungsmotoren-BHKW

BHKW-Verbrennungsmotoren (5) sind für den Dauerbetrieb modifizierte langsamlaufende Hubkolbenmotoren mit einer Drehzahl von 1.500U/min und decken ein Leistungsspektrum von einem bis zu mehreren Megawatt elektrischer Leistung ab. Es wird zwischen den überwiegenden eingesetzten Gas-Ottomotoren, Dieselmotoren und für den Gasbetrieb weiterentwickelte Dieselmotoren, den Zündstrahlmotor unterschieden. Die Gas-Ottomotoren saugen ein Gas-/Luftgemisch an, verdichten es im Gasmischer und mittels der Zündkerze wird der Brennvorgang im Brennraum eingeleitet. Die Verbrennung ist weitgehend rußfrei, was eine geringe Belastung des Schmieröls mit physikalischen Verunreinigungen und damit geringen Verschleiß und hohe Lebensdauer aller Motorsysteme erwarten lässt. Eine Lastregelung bis zu 50% der Nennleistung ist mit minimaler Wirkungsgradverringerung möglich. Beim Dieselmotor wird der Brennstoff direkt in die vom Kolben komprimierte Luft des Brennraums eingespritzt. Auf Grund der hohen Temperaturen der Glühkerzen entzündet sich der Brennstoff. Durch die anschließende Expansion im Brennraum erfolgt die Hubbewegung der Kolben.

Gas-Dieselmotoren werden mit Erd- oder Biogas betrieben, benötigen aber für die Zündung des hoch verdichteten Gas-Luft-Gemisches eine geringe Menge an Dieseldieselkraftstoff 5 – 10 % als Zündstrahl. Im Vergleich zum Gas-Ottomotor ist das Teillastverhalten des Zündstrahlmotors ungünstiger. Durch den unvollständigen Verbrennungsvorgang im Teillastbetrieb bleibt ein Teil des Gases unverbrannt und führt so zu einer starken Verringerung des Teillastwirkungsgrades. Ein Betrieb kleiner als 70% der Nennlast ist zu vermeiden. Weiterhin kann beim Zündstrahlmotor unterbrechungsfrei auf reinen Dieselbetrieb umgeschaltet werden. Dies bietet den Vorteil, dass Diesel als Alternativbrennstoff verwendbar ist und somit mit dem Gasversorgungsunternehmen ein unterbrechbarer Erdgasbezugsvertrag abgeschlossen werden kann. Da der Erdgasbezugspreis aus einem Leistungs- und Arbeitspreisanteil besteht, entfällt hier der Leistungspreisanteil beim Erdgasbezugspreis, da das Gasversorgungsunternehmen die Erdgasvorhalteleistung in Zeiten des Erdgasspitzenbedarfs nicht vorhalten muss, sogar bewusst

unterbrechen kann, weil der Ersatzbrennstoff Diesel jederzeit im BHKW-Betrieb unterbrechungsfrei eingesetzt werden kann. Dadurch reduzieren sich die Erdgasbezugskosten auf den Arbeitspreisanteil. Dieses kann dazu führen, dass der Erdgaspreis nicht über dem Heizölpreis liegt und somit ein besonders wirtschaftlicher BHKW-Betrieb möglich ist. Bezüglich der einzelnen Wirkungsgrade von Verbrennungsmotoren zeigt sich ein ausgewogenes Verhältnis. Gas-Dieselmotoren erreichen ähnlich hohe elektrische Wirkungsgrade wie die Dieselmotoren.

Verbrennungsmotoren	Leistungsspektrum $P_{el}$	Wirkungsgrade		
		$\eta_{el}$	$\eta_{th}$	$\eta_{ges}$
<b>Gas-Ottomotor</b>	0,002 - 6,1 MW <sub>el</sub>	26 - 44%	39 - 67%	70 - 98%
<b>Heizölbetriebener Dieselmotor</b>	0,005 - 17,0 MW <sub>el</sub>	28 - 46%	43 - 60%	77 - 91%
<b>Zündstrahlmotor</b>	0,050 - 16,5 MW <sub>el</sub>	35 - 45%		bis 90%

Tabelle 1: Wirkungsgrade BHKW-Verbrennungsmotoren (14)

#### 3.4.1.1 Wärmeauskopplung

Auf Basis der Motor-Generator-Aggregate wird die chemisch gespeicherte Energie der Brennstoffe in thermische, mechanische und elektrische Nutzenergie umgewandelt. Die anfallende Wärmeenergie wird in verschiedenen Wärmeübertragern dem Abgas (400°C – 600°C) des Motors, dem Motorkühlwasser, Generatorabwärme, dem Schmieröl (80°C – 90°C) und ggf. der Ladeluft entzogen und auf einem Temperaturniveau von bis zu 100 °C zur weiteren Nutzung zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe spezieller Wärmetauscher können die Abgase soweit abgekühlt werden, dass der im Abgas enthaltene Wasserdampf kondensiert. Die Auslegung der Wärmetauscher orientiert sich an den üblichen Temperaturverhältnissen in Heizungsanlagen von 90°C im Vorlauf und 70°C im Rücklauf. Das umlaufende Wasser wird zunächst im Kühlwasserwärmetauscher auf ca. 80°C vorgewärmt und im nachgeschalteten Abgaswärmetauscher auf etwa 90°C Vorlauftemperatur angehoben. Hierdurch wird das Abgas bis auf etwa 120°C beim Gasottomotor bzw. auf etwa 180°C beim Dieselmotor abgekühlt. Das aufgeheizte Wasser durchläuft dann das Heizungssystem zur Wärmeabgabe des Versorgungsobjektes und wird gegebenenfalls für die Warmwasseraufbereitung einem zusätzlichen Wärmetauscher zugeführt. Dampf oder Heißwasser über 90°C für Prozesszwecke lassen sich mit der Abgaswärme ebenfalls erzeugen. Durch

Trennung der Abwärmequellen Abgas und Kühlwasser ist auch hier die Möglichkeit der Dampferzeugung gegeben. Bei heißgekühlten Motoren erreicht man Kühlwassertemperaturen bis zu 130°C, die für die Dampferzeugung genutzt werden können.

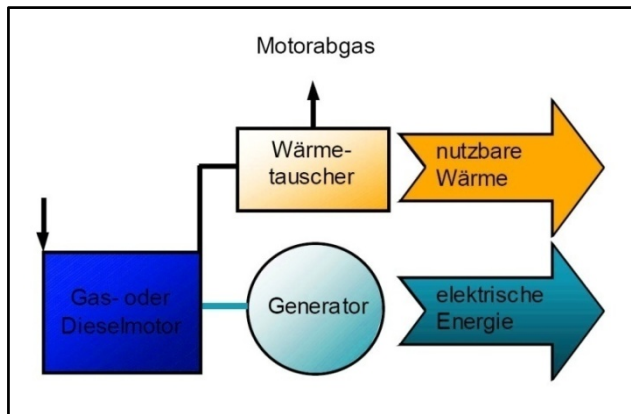


Abbildung 12: BHKW-Prozess

#### 3.4.1.2 Emissionen

Von den Verbrennungsmotoren ausgehenden Emissionen wie Lärm, Schwingungen und Abgase werden Maßnahmen ergriffen die eine Minderung dieser mit nach sich ziehen. Die einzuhaltenden Grenzwerte sind in der „Technischen Anleitung Lärm“ (TA Lärm) und der TA Luft definiert und geregelt. Lärmemissionen wie Luft- und Körperschallschwingungen können mittels elastischer Lagerung der Motor-Generator-Einheit, Schwingungsisoliertes Fundament, Abgasschalldämpfer und Schallschutzhauben problemlos begrenzt werden. Die Maßnahmen zur Abgasreduktion sind in Anbetracht der erheblichen Umwelteinflüsse wesentlich Bedeutungsvoller und lassen sich in zwei Kategorien unterteilen. Emissionsreduktionsmaßnahmen, welche darauf ausgelegt sind, Emissionen gar nicht erst entstehen zu lassen, wie z.B. der Kraftstoffeinsatz von Erdgas anstatt Heizöl werden als primäre Maßnahmen bezeichnet. Eine weitere primäre Maßnahme ist die Optimierung der Motortechnik die entscheidend durch die Änderung der Zusammensetzung des Luft-Brennstoff-Gemisches Emissionsreduktionen hervorruft (Magerkonzept) (5). Die zweite Kategorie der Emissionsreduktionsmaßnahmen sind Abgasreinigungstechniken, welche die Konzentration der im Abgas enthaltenen Schadstoffe verringern. Die so genannten sekundären Maßnahmen, wie z.B. die katalytische Reinigung oder Filterung der Abgase. Dazu gehören Nach



heutigem Stand der Technik werden nachstehende Verfahren zur Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte angewandt:

- Dreiwege-Katalysator
- Mager-Konzept
- SCR-Verfahren
- Oxidations-Katalysator
- Dieselpartikelfilter

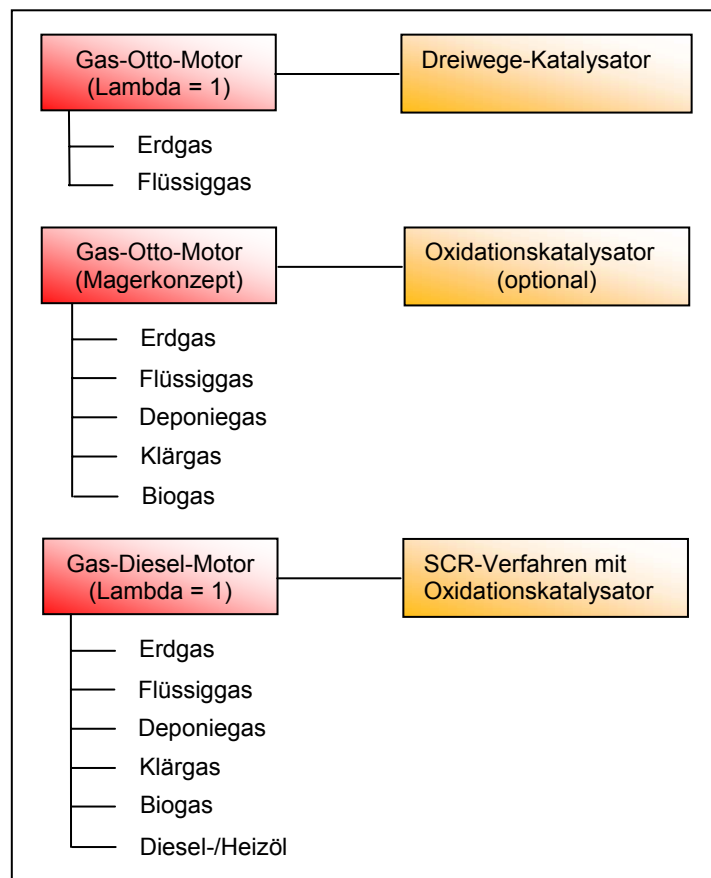


Abbildung 13: Übersicht Abgasreinigung

### 3.4.1.3 Zusammenfassung

#### Vorteile:

- hoher Gesamtwirkungsgrad
- sehr gutes Teillastverhalten
- Modulbauweise
- Geringer Wartungsaufwand
- Viele Anbieter am Markt vorhanden

#### Nachteile:

- Erzeugung von Hochtemperaturwärme nicht möglich

### **3.4.2 Mikro-Gasturbinen-BHKW**

Im Gegensatz zum Gasturbinen-Heizkraftwerk ist mit der Kompaktheit der Mikro-Gasturbinenanlage eine Blockbauweise möglich und kann daher ebenfalls als BHKW angesehen werden. Unter Mikro-Gasturbinen versteht man kleine, schnelllaufende Gasturbinen mit niedrigen Brennraumtemperaturen und geringen Brennkammerdrücken. Sie weisen auf Grund ihrer einfachen Konstruktion relativ geringe Investitions-, Instandhaltungs- und Betriebskosten auf und sind mit einer elektrischen Leistung bis zu 200 kW (14) für dezentrale Anwendungen konzipiert. In Mikro-Gasturbinen-BHKW sind der Verdichter und die vom Turboladerprinzip abgeleitete Entspannungsturbine zusammen mit dem Generator auf einer schnelllaufenden Welle montiert. Der Verdichter saugt die Verbrennungsluft an, die im Rekuperator durch die Abgase der Turbine vorgewärmt wird. Im Anschluss wird das Luft-Erdgas-Gemisch in der Brennkammer verbrannt und in der Turbine entspannt. Die thermische Energie des Abgases liegt auf einem Temperaturniveau von 270°C bis 680°C und wird über den Abgaswärmetauscher genutzt. Die Turbinen werden mit Drehzahlen von 70.000 bis 100.000 Umdrehungen pro Minute betrieben. Mit Hilfe der Leistungselektronik wird der so erzeugte hochfrequente Wechselstrom zunächst gleichgerichtet und anschließend in netzfähigen, 3-phasigen Wechselstrom invertiert. Die Leistungselektronik erlaubt als „elektronisches Getriebe“ einen Verzicht auf eine Synchronisierungseinrichtung und ermöglicht einen effektiven Teillastbetrieb mit nur geringen Wirkungsgradverlusten. Die Regelung der Leistung erfolgt über eine Änderung der Turbinendrehzahl. Zum Start wird die Turbine im Motorbetrieb vom Generator angetrieben, der die Turbine auf die benötigte Startdrehzahl bringt. Der Generator / Motor wird dabei im Netzparallelbetrieb aus dem Stromnetz gespeist. Im Inselbetrieb ist ein Batteriespeicher erforderlich.

#### **3.4.2.1 Wärmeauskopplung**

Trotz der hohen Luftzahlen betragen die Abgastemperaturen am Austritt des Rekuperators abhängig vom Anlagentyp mindestens 260 °C. Mit diesen Temperaturen und dem relativ großen Abgasmassenstrom ist im Gegensatz zu den motorischen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen eine Nutzung der Mikro-Gasturbinen zur gekoppelten Erzeugung von elektrischem Strom und Wärme mit sehr hohen

Temperaturen möglich. Diese Wärme steht nun für Heizzwecke, Dampferzeugung oder für Absorptionskälteanlagen zur Verfügung.

### 3.4.2.2 Emissionen

Die Mikrogasturbine zeichnet sich gegenüber motorisch betriebenen BHKW durch sehr geringe Schall- und Abgasemissionen aus. Bei der Verwendung von Erdgas zeichnen sich die folgenden Werte aus: NO<sub>x</sub>-Gehalt bei 25 ppm, der CO-Gehalt kann durch nachgeschalteten Katalysator noch weiter reduziert werden.

### 3.4.2.3 Zusammenfassung

#### Vorteile:

- Geringer Wartungsaufwand
- Kompaktbauweise
- leise, sehr geringe Schallemissionen
- Geringer Wartungsaufwand

#### Nachteile:

- anfällig bei vielen Lastwechseln  
wärme nicht möglich
- ineffizienter elek. Wirkungsgrad
- höhere spez. Investitionskosten
- Volle Marktreife noch nicht erreicht

### 3.4.3 Stirlingmotoren-BHKW

Das Stirlingmotor-BHKW befindet sich noch in der Entwicklungsphase, zur Zeit sind Kleinserien auf dem Markt, die ihre Praxistauglichkeit beweisen müssen. Die Markteinführung wurde bereits mehrfach angekündigt doch dann immer wieder verschoben (14). Der Einsatz ist jedoch vielversprechend, denn der Stirlingmotor ist umweltfreundlich und kann sowohl fossile Brennstoffe als auch erneuerbare Energieträger nutzen. Beim Stirling-Motor findet keine interne Verbrennung statt. Das im Zylinder befindliche Arbeitsgas (meist Helium) wird ständig zwischen einem äußerlich erhitzten und einem abgekühlten Reservoir bewegt, wobei die Menge des Arbeitsgases konstant bleibt. Ein Verdrängerkolben ändert zudem das Volumen des Arbeitsgases. Idealerweise erhält man zwei isochore und zwei isotherme Zustandsänderungen. Nach durchlaufen der vier Takte befindet sich das Gas wieder am Ausgangspunkt, es handelt sich um einen geschlossenen Kreisprozess bei dem Energie frei wird. Zum Betrieb eines Stirling-Motors werden nur zwei Reservoirs mit unterschiedlicher Temperatur benötigt. Im Stirling-BHKW treibt ein Kolbenmotor mit äußerer Verbrennung einen angekoppelten Generator zur Stromerzeugung an. Beim Einsatz einer stationären Verbrennung als Wärmequelle kann die Schadstoffemission einfach analysiert, der Verbrennungsprozess optimiert und günstige Abgaswerte erreicht werden. Des Weiteren arbeitet der Stirlingmotor unabhängig von der Wärmequelle und eignet sich damit insbesondere auch für den Betrieb mit erneuerbaren Kraftstoffen, da er unempfindlich gegenüber Schwankungen in der Gasqualität ist. Da Rückstände aus der Verbrennung nicht in den Motor gelangen können, ist der Verschleiß sehr gering und es können hohe Laufzeiten erwartet werden.

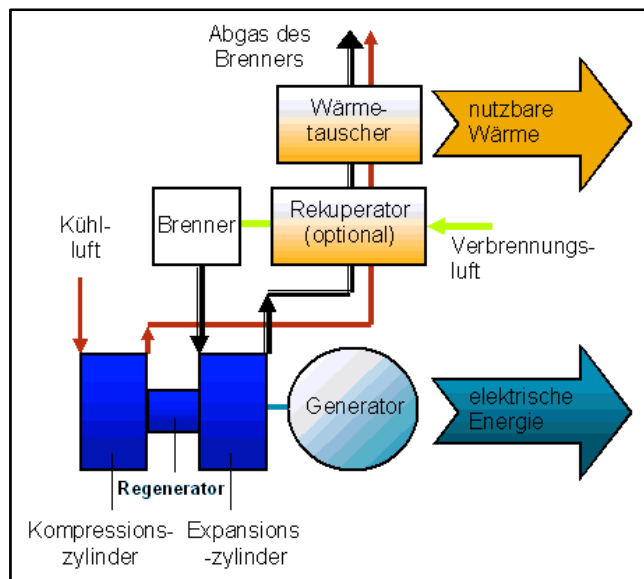


Abbildung 14: Stirling-Prozess

### 3.4.3.1 Wärmeauskopplung

Die Abwärme der Kühlluft sowie die Abwärme des Rauchgases können zur Wärmenutzung verwendet werden. Sinkt der Wärmebedarf, so kann die Abwärme variabel zur Verbrennungsluftvorwärmung verwendet werden.

### 3.4.3.2 Emissionen

Sehr geringe Abgase. Die Emissionen liegen auch bei hoher Luftvorwärmung weit unterhalb der TA Luft Richtwerte. Kohlenwasserstoffe oder Ruß sind nicht nachweisbar im Abgas enthalten

### 3.4.3.3 Zusammenfassung

#### Vorteile:

- gute Regelbarkeit
- Wartungsarm
- Geräuscharm
- unabhängig von Befeuerungsart
- geringe Emissionen ohne Abgasreinigg.

#### Nachteile:

- Lebensdauer, Marktreife noch nicht erreicht
- nur geringe Leistungen möglich
- höhere spez. Investitionskosten
- schlechtes Teillastverhalten

#### 3.4.4 Brennstoffzellen-BHKW

Das Funktionsprinzip eines Brennstoffzellen-BHKW (14) unterscheidet sich von den zuvor beschriebenen Funktionsweisen. Mit der Brennstoffzelle kann die chemische Energie von Wasserstoff direkt sowie anderer gasförmiger Energieträger wie Erdgas und Biogas oder verdampfte flüssige Kraftstoffe nach Reformierung in Gleichstrom umgewandelt werden. Durch die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie ist die Stromerzeugung mit Brennstoffzellen sehr effizient. Die bei allen Wärmekraftprozessen durch das Carnotsche Gesetz beschriebene Wirkungsgradbegrenzung entfällt, so dass in einer Brennstoffzelle hohe Wirkungsgrade erreicht werden können. Ein weiterer Vorteil der Brennstoffzelle ist, dass sie in einem weiten Bereich schwankende Belastungen verkraftet, ohne wesentlich an Effizienz zu verlieren. Grundsätzlich besteht eine Brennstoffzelle aus einem Elektrolyten, einer Kathode und einer Anode. Die Brennstoffzellen unterscheiden sich hinsichtlich des eingesetzten Elektrolytes in Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturbrennstoffzellen. Die Art des Elektrolytes ist weitgehend entscheidend für die Betriebstemperaturen und ob positiv geladene Kationen ( $H^+$ ) oder negativ geladene Anionen ( $OH^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $O^{2-}$ ) transportiert werden. Zu den Niedertemperaturbrennstoffzellen zählen die AFC (Alcaline Fuel Cell) und die PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), deren Betriebstemperaturen bei etwa 70 °C bzw. 100 °C liegen. Im mittleren Temperaturbereich von 160 bis 220 °C werden die PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) betrieben und zu den Hochtemperaturzellen gehören die bei etwa 800°C bis 1000°C arbeitenden Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle (MCFC) und SOFC (Solid Oxid Fuel Cell). Als Brennstoff dient jeweils der Anode Wasserstoff, der durch chemische Prozesse, aus einem Prozessgas (Erdgas und Wasserdampf) unter Mitwirkung von Katalysatoren, im so genannten Reformer gewonnen wird. Der an der Kathode erforderliche Sauerstoff wird der Umgebungsluft entnommen. Der Anode wird kontinuierlich Wasserstoff zugeführt, der dort seine Elektronen abgibt. Es entstehen  $H^+$ -Ionen. Die dabei freigesetzten Elektronen können den Elektrolyten nicht passieren und werden über einen äußeren Leiter zur Kathode geleitet. An der Kathode wird Sauerstoff zugeführt, der mit den ankommenden Elektronen  $O^{2-}$ -Ionen bildet. Je nach eingesetztem Elektrolyten ist dieser entweder nur für  $H^+$ -Ionen oder für  $O^{2-}$ -Ionen durchlässig. Wandern die  $H^+$ -Ionen durch den Elektrolyten zur Kathode, so reagieren sie dort mit den  $O^{2-}$ -Ionen zu Wassermolekü-

len ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Wandern hingegen die  $\text{O}_2$ -Ionen zur Anode, so entsteht dort Wasser. Die durch den äußeren Stromkreis von der Anode zur Kathode fließenden Elektronen erzeugen einen elektrischen Gleichstrom. Parallel dazu wird bei der Reaktion Wärme freigesetzt.

Brennstoffzellen-BHKW für die Energieversorgung befinden sich noch in der Entwicklungsphase. Im Rahmen von Feldversuchen wird der Betrieb einer größeren Anzahl von Anlagen bereits getestet. Stationäre Großanlagen wie die Hotmodule von MTU CFC Solutions in der ehemals DeTe-Niederlassung München mit  $250 \text{ kW}_{\text{el}}$  und in den Mechelinwerk in Karlsruhe mit ebenfalls  $250 \text{ kW}_{\text{el}}$  sind seit 2008 stillgelegt (14).

#### **3.4.4.1 Wärmeauskopplung**

Auf Grundlage der unterschiedlichen Betriebstemperaturen der Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturbrennstoffzellen lassen sich Rückschlüsse für die zukünftige Abwärmenutzung ziehen. PAFC Phosphorsaure Brennstoffzellen finden ihre mögliche Anwendung in Nahwärmenetze mit max.  $75^\circ\text{C}$  Vorlauftemperatur. Des Weiteren besteht die Möglichkeit zur Installation einer Hochtemperatur-Auskopplung mit einer Vorlauftemperatur von maximal  $120^\circ\text{C}$  zur Dampferzeugung oder Kraft- Wärme-Kälte-Kopplung. Die SOFC Oxidkeramische Brennstoffzelle und MCFC Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle mit ihren Temperaturbereich von  $160^\circ\text{C}$  bis  $1000^\circ\text{C}$  können ebenso zusätzlich zur Wärmeversorgung Prozessdampf für industrielle Anwendungen auskoppeln.

#### **3.4.4.2 Emissionen**

Die Emissionswerte der Brennstoffzelle liegen weit unterhalb der Grenzwerte der TA Luft.

### 3.4.4.3 Zusammenfassung

#### Vorteile:

- sehr hoher Gesamtwirkungsgrad
- Wartungsarm
- Geräuscharm
- hervorragendes Teillastverhalten
- geringe Emissionen
- einfacher Modularer Aufbau

#### Nachteile:

- sehr hohe Investitionskosten
- Lebensdauer
- Marktreife noch nicht erreicht

## 3.5 Stromerzeugung und Netzanbindung

Für die Stromerzeugung werden je nach Leistung und Erfordernissen in den mit Motoren oder Turbinen betriebenen BHKW wahlweise Asynchron- oder Synchrongeneratoren eingesetzt. In der überwiegenden Betriebsweise, dem Netzparallelbetrieb, werden die robusten und kostengünstigeren Asynchrongeneratoren (14) verwendet. Diese können ohne besondere Vorkehrungen direkt oder starr an das Netz des Energieversorgungsunternehmens (EVU) geschaltet werden, da sie durch die anliegende EVU-Spannung erregt werden und bedingt durch den Schlupf der Asynchrongeneratoren weich an das Netz ankoppeln. Nachteilig ist jedoch der erhöhte Blindstrombedarfs, so dass ein Einsatz nur bei geringen elektrischen Leistungen sinnvoll ist und auf eine zusätzliche Blindleistungskompensationsanlage verzichtet werden kann. Synchrongeneratoren sind indes mit speziellen Reglern ausgerüstet die während der Synchronisation mit dem Netz die Generatorspannung, die Phasenlage und die Frequenz an das Netz anpassen. Im Netzparallelbetrieb wird der Leistungsfaktor des Synchrongenerators durch einen  $\cos\phi$ -Regler geregelt. Im Inselbetrieb und auch somit möglichen Notstrombetrieb wird der Synchrongeneratorfrequenz über die Drehzahl des Motors geregelt. Des Weiteren besitzt der Synchrongenerator einen höheren Wirkungsgrad als der Asynchrongenerator, ist dafür aber auch kostenintensiver. Beide Generatorenarten sind in luft- oder wassergekühlter Ausführung am Markt erhältlich. Der durch die Generatoren niederspannungsseitig erzeugte elektrische Strom wird in Energieverteilungssysteme, bestehend aus Kabelnetz, Niederspannungshauptverteilung, Leistungsschaltern, zentraler Steuerung und Zähl- und Messeinrichtungen (Vier-Quadranten-Zähler) zum Eigenverbrauch einges-



peist. Eventuell erzeugte Überschüsse werden bei Klein-Anlagen in das öffentliche Niederspannungsnetz oder ab einer maximalen BHKW-Leistung von 1 MW<sub>el</sub> über Transformatoren dem Mittelspannungsnetz des EVU zur Verfügung gestellt (7). Eine Einspeisevergütung erfolgt entsprechend dem KWK-Gesetz. In Abbildung ist die Netzanbindung schematisch von 3 BHKW-Modulen veranschaulicht.

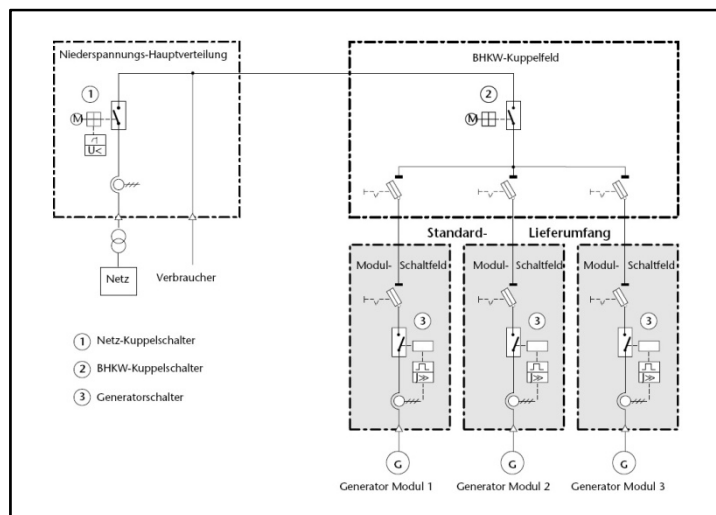


Abbildung 15: Netzanbindung eines mehr Modul BHKW

Bei der Wahl der Einbindung des BHKW ist der aktuelle Strombezugspreis zwingend mit zu berücksichtigen. Vorteilhaft kann es sein den gesamten erzeugten Strom parallel zum Bezugszähler in das Netz des Energieversorgers einzuspeisen. Diese Methode findet Anwendung, wenn für die Vergütung ein höherer Preis erzielt als der BHKW Betreiber für den Strombezug entrichten muss.

### 3.6 Wärmeversorgung und Hydraulische Einbindung

Wie bereits im Kapitel 3.2 Einsatzmöglichkeiten und allgemeine Funktionsweise eines BHKW beschrieben werden BHKW in Verbindung mit Spitzenlastkesseln und Pufferspeichern betrieben. Die Abdeckung der thermischen Grundlast (ca. 60%) realisiert das BHKW, während der Spitzenlastkessel in den Phasen mit sehr hohem Heizbedarf die zusätzliche Wärmemenge zur Verfügung stellt. Bei Neuanlagen ergibt sich die erforderliche thermische Leistung des Spitzenkessels aus der Differenz zwischen der maximalen Wärmelast und der thermischen BHKW-Leistung. Um die Wärmeversorgung bei Ausfall oder Wartungsarbeiten des BHKW sicherzustellen wird der Spitzenlastkessel in der Praxis bei unkriti-

schen Verbrauchern etwas größer gewählt und bei kritischen Verbrauchern wie Krankenhäuser auf die maximale Wärmelast dimensioniert. Die Integration von Pufferspeichern in das hydraulische System ermöglicht dem BHKW eine optimale und taktfreien Betriebsweise auch bei kurzfristigen Wärmebedarfsänderungen. Die Pufferspeicher sollten als Schichtenspeicher (12) ausgelegt sein, so dass mittels eingearbeiteten Leitblechen das aufgeheizte Wassers langsam von oben nach unten geleitete werden kann. Vorzugsweise sollten alle Wärmeerzeugen in den Speicher laden. Im Pufferspeicher oben wird das Heizungswasser entnommen. Unten befindet sich das kälteste Wasser, als Rücklauf (Kühlwasser) für das BHKW. Kurzfristige Temperaturänderungen wirken sich im Speicher erst sehr langsam aus und geben dem BHKW Zeit zu regeln oder abzuschalten. Neben dem Effekt, dass der Pufferspeicher das System träge macht, fungiert der Puffer meist auch als hydraulische Weiche. Dabei werden Volumenstromdifferenzen ausgeglichen, wenn die Heizkreise mehr Wasser anfordern als der Wärmeerzeugerkreis gerade liefert und umgekehrt. Weiterhin wird so die volle Leistungsabgabe jedes Wärmeerzeugers im System ermöglicht. Die Speicherkapazität ist auf mindestens 50% der stündlichen Wärmeleistung eines BHKW-Moduls auszulegen.

Um den Heizungswasserstrom richtig zu führen und dem BHKW immer ausreichendes Kühlwasser zukommen zu lassen, liegt ein Schwerpunkt auf der Hydraulik. Bei der Integration in die Heizungsanlagen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Welche davon auszuwählen ist, hängt sowohl von den spezifischen Anforderungen an das Gesamtsystem als auch von den übrigen Systemkomponenten wie Anzahl der BHKW-Aggregate, Pufferspeicher und der Hydraulik der Verbraucher ab. Dabei ist insbesondere zwischen dem Betrieb in Verbindung mit konventionellen Heizkesseln sowie mit Brennwertkesseln zu unterscheiden. Des Weiteren ist für die hydraulische Einbindung eines BHKW – also die Integration in das Rohrleitungssystem zur Wärmeübertragung – folgendes zu beachten (14):

- Ausführung ist einfach, kostengünstig und betriebssicher auszuführen
- Das BHKW hat immer Vorrang, um somit lange taktfreie Laufzeit zu gewährleisten.

- Die Vorlauftemperatur des Blockheizkraftwerks, d.h. die Temperatur des Wassers beim Verlassen des BHKWs, sollte möglichst hoch (80-90°C) sein, um durch daraus resultierende hohe Temperaturdifferenzen eine gute Wärmeübertragung zu erreichen.
- Bei der Kombination mit Brennwertkesseln sollte das BHKW nicht in Serie vor dem Heizkessel installiert werden, sondern parallel dazu. Bei zu hohen Vorlauftemperaturen des Brennwertkessels könnte ansonsten der Brennwerteffekt nicht mehr genutzt werden.
- Die Rücklauftemperatur, d.h. die Temperatur des Wassers beim Eintritt ins BHKW, darf nicht über dem vom Hersteller angegebenen Maximalwert (i.d.R. 70 °C) liegen, ansonsten ist mit einem häufigen Takten des BHKWs und Störungen zu rechnen. Abhilfemaßnahmen, die dieses garantieren, sind z. B. Rücklauftemperaturbegrenzer oder elektronisch geregelte Heizkreisumpen
- BHKWs sollten in Fließrichtung nicht hinter einen Kessel geschaltet werden, immer in den Rücklauf.
- Der Volumenstrom der Wärmeerzeuger sollte an die thermische Leistung der Wärmeverbraucher angepasst sein (hydraulischer Abgleich).
- Betriebstemperatur des Motors über Thermostat im Modul oder Temperaturhochhaltung extern absichern.
- Pumpen von Verbrauchern und Erzeugern hydraulisch entkoppeln
- Mit Unterstützung von Heizungspufferspeichern die Reaktionszeiten der Gesamtanlage verlängern.
- Bei Heizkreisregelungen ist darauf zu achten, dass bei geschlossenem Heizkörper der Kreislauf nicht abgesperrt ist. Mit Überströmern ist zu gewährleisten, dass Vor- und Rücklauftemperaturen noch gemessen werden.
- Anpassung der Verbraucherheizkreise: Schließen von Überströmstrecken, Anpassung von Umlenkschaltungen und Einbau von Rückschlagklappen.

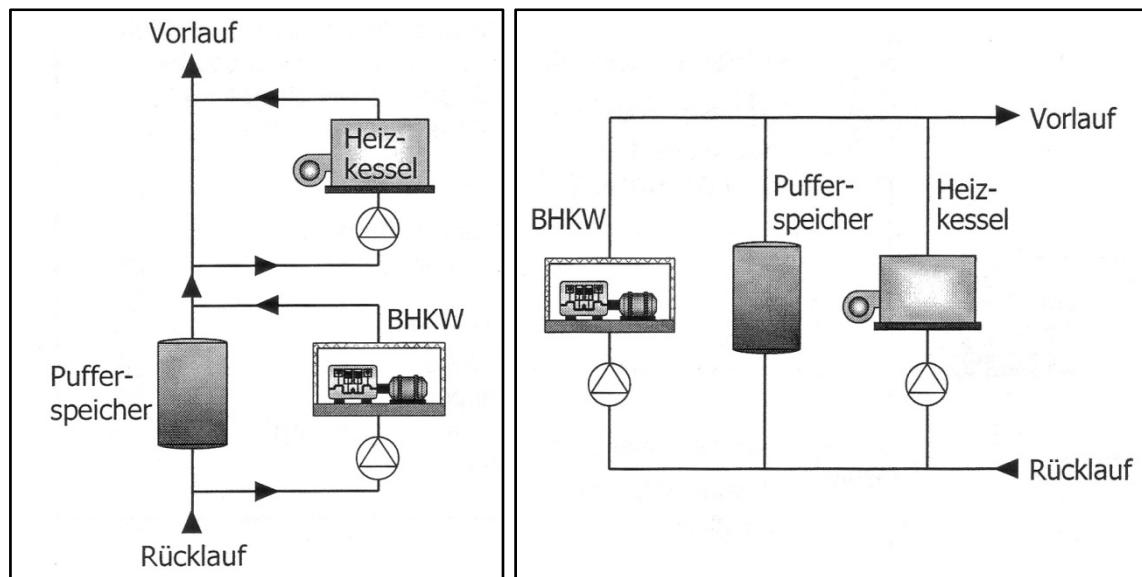


Abbildung 16: Hydr. Reihenschaltung (14) Abbildung 17: Hydraulische Parallelschaltung (14)

Prinzipiell werden zwei Einbindungsarten unterschieden, die Reihenschaltung und die Parallelschaltung von BHKW und Kessel. Vorteile der BHKW – Kessel - Reihenschaltung ist die einfache Hydraulik und der Erweiterbarkeit der Anlage. Nachteilig ist die Integration von Brennwertkesseln, die nur mit separaten Wärmetauschern möglich ist. Der Regelaufwand ist geringer als gegenüber der Parallelschaltung, die zusätzlich meist eine übergeordnete Steuerung benötigt. Jedoch zeichnet sich die parallel - hydraulische Anordnung mit hoher Flexibilität aus und dem uneingeschränkten möglichen Einsatz von Brennwertkesseln.

### 3.7 Zusammenfassung

Die vier vorgestellten BHKW-Technologien besitzen auf Grund ihrer signifikanten Parameter unterschiedliche Bedeutung bei der Etablierung am Markt. Insbesondere zeichnen sich durch die ausgereifte und bereits tausendfach erprobte Technologie die Verbrennungsmotor-BHKW aus (14). Sie besitzen daher das höchste Potential in einem universitären Klinikum Anwendung zu finden. Dagegen ist bei den sich in der Markteinführung befindenden Brennstoffzellen- BHKW, positiv die deutlich günstigeren Betriebswerte herauszustellen. Des Weiteren eignen sich die neuen Technologien, mit Ausnahme der Brennstoffzelle, bisher lediglich zur Versorgung kleinerer Verbraucher, sind von der Skalierbarkeit den BHKW mit Kolbenmotoren als unterlegen anzusehen. In der Abbildung 18 sind in Abhängigkeit der Wirkungsgrade sowohl die 4 BHKW-Technologien als auch weitere KWK-Kraftwerksprozesse mit unterschiedlichen Leistungen dargestellt.

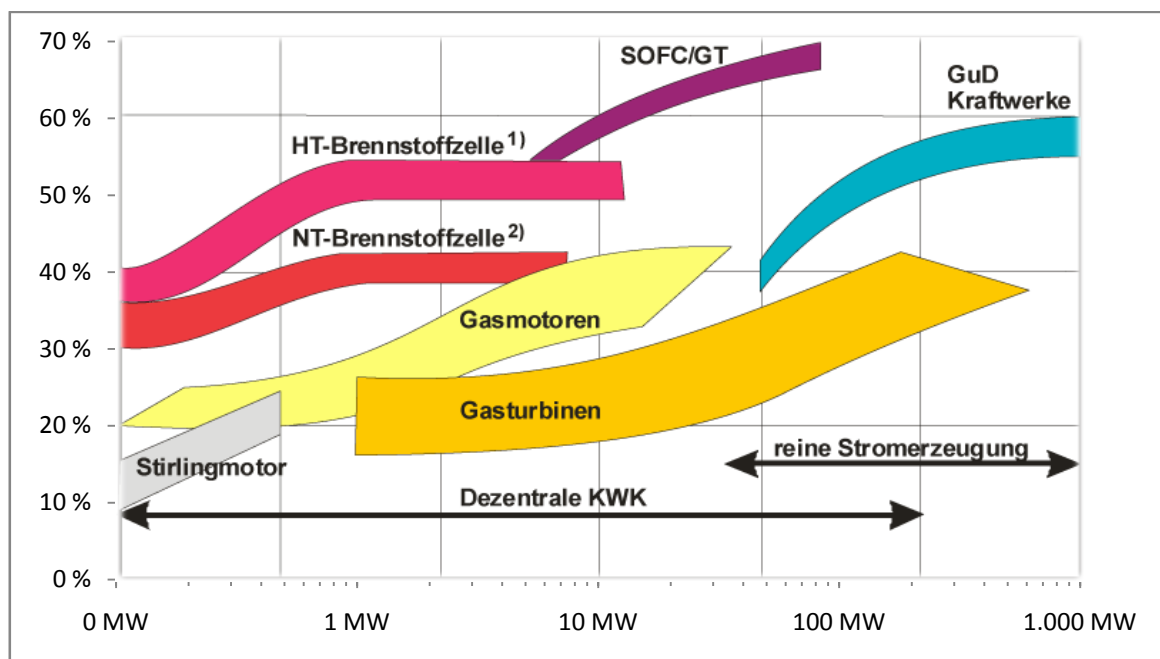


Abbildung 18: Leistung- und Wirkungsgradübersicht von KWK-Technologien (17)

## **4 Planung und Auslegung von Blockheizkraftwerken**

In diesem Kapitel wird auf die wichtigsten Faktoren für die Planung, Auslegung und damit der Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage eingegangen. Die Auswahl und Dimensionierung von KWK-Anlagen erfordert in allen Planungs- und Ausführungsschritten ein hohes Maß an Genauigkeit, da die Wirtschaftlichkeit der Anlage entscheidend von der richtigen Größe des kompletten Systems abhängt. Erfolgt die Dimensionierung eines BHKW zu klein, kann nicht das gesamte Einsparungspotenzial hinsichtlich der Energiekosten ausgeschöpft werden. Wird es hingegen zu groß ausgelegt, dann muss es zur Deckung des Bedarfs je nach System häufig im Wirkungsgrad reduzierten Teillastbetrieb oder im Taktbetrieb betrieben werden. Um die den Bedarf angepasste Anlagenauswahl sicherzustellen, muss das technisch Machbare mit den wirtschaftlich Notwendigen verknüpft und abgestimmt werden. Des Weiteren erfordern die unterschiedliche Rahmenbedingungen an den Versorgungsobjekten im Allgemeinen, eine individuelle Planung und Dimensionierung des Blockheizkraftwerks, wobei die thermische und elektrische Energie zu berücksichtigen sind.

Die VDI-Richtlinie 3985 „Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Verbrennungskraftmaschinen“ (18) bietet ein formalisiertes Konzept für die Realisierung von KWK-Anlagen. In dieser werden die drei Phasen Planung, Ausführung und Inbetriebnahme definiert und ausführlich beschrieben. Im Anhang 1 ist das Arbeitsablaufdiagramm der Richtlinie mit den wesentlichen Arbeitsschritten hinsichtlich Voruntersuchung, Planung und Ausführung abgebildet. Aufbauend auf die VDI-Richtlinie werden in den nachfolgenden Abschnitten praxisorientierte Grundregeln, die bei einer Planung und Auslegung eines BHKW zu beachten sind dargestellt

### **4.1 Ermittlung des elektrischen und thermischen Energiebedarfs**

Im Rahmen der Voruntersuchung und Planung sind die Objekt spezifischen Energiemengen des Strom-, Wärme und Kältebedarfs im zeitlichen Zusammenhang zu ermitteln. Von Interesse sind dabei nicht nur die Spitzenwerte der Leistungen sondern auch eine Übersicht aller im Versorgungsobjekt vorhandenen Nutzparameter wie Temperaturen, Drücke, Medien und elektrische Leistungs-

größen und ihrer Verteilung. Aufschluss geben hierfür in erster Linie die Energieabrechnungen und Lastgangdaten der Versorgungsunternehmen. Diese Lastgangdaten dienen vor allem zur Visualisierung und Analyse von aussagekräftigen Jahres-, Wochen- und Tagesganglinien der Energieverbräuche, die etwaige Abhängigkeiten und Gleichzeitigkeiten untereinander sowie gegenüber äußeren Einflüssen wie Temperaturen und Jahreszeiten abbilden. Je detaillierter der zeitliche Verlauf des Strom-, Wärme- bzw. Kältebedarfs vorliegt, desto genauer kann die Laufzeit des BHKW und die Energiebilanz berechnet und damit die Wirtschaftlichkeit abgeschätzt werden. Darüberhinaus sind Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Energiemengen zu prognostizieren. Sanierungen von Gebäuden, Neubauten sowie alle zukünftig angedachten Energieeinsparungen sind einzubeziehen. Die hohe Bedeutung der sorgfältig zu ermittelnden Energiemengen begründet sich daraus, dass KWK-Anlagen einerseits eine relativ hohe Lebensdauer aufweisen und andererseits ein optimaler Betrieb nur in einem sehr begrenzten Rahmen möglich ist. Im späteren Betrieb kann folglich auf Veränderungen nur in geringem Maße reagiert werden und Fehler in der Planungsphase können im Laufe der Zeit zu einem unwirtschaftlichen Betrieb des BHKW führen.

#### **4.1.1 Ermittlung Wärmebedarf und Wärmeleistungsbedarf**

Für die Ermittlung des tatsächlichen Energiebedarfs sind die im vorangegangenen Abschnitt bereits beschriebenen Verbrauchsdatensätze des zuständigen EVU Grundlage. Der Wärmebedarf wird im Allgemeinen bei fehlenden Wärmemengenzählern aus dem dokumentierten Brennstoffverbrauch und dem Nutzungsgrad des Heizkessels abgeleitet. Der Brennstoffverbrauch setzt sich aus einem Anteil zur Bereitstellung von Heizwärme, der von der Außentemperatur und der Nutzung des Objektes abhängt und einem Anteil für die Warmwasserbereitstellung zusammen. Mit dieser Kenntnis und dem Brennstoffverbräuchen in den Sommermonaten lassen sich Rückschlüsse auf den Wärmebedarf für die Raumheizung, für den Warmwasserbedarf und den gesamten Wärmebedarf des Objektes ziehen. Beispielhaft zeigt die Abbildung 19 einen typischen Wärmebedarf über den Zeitraum eines Jahres.

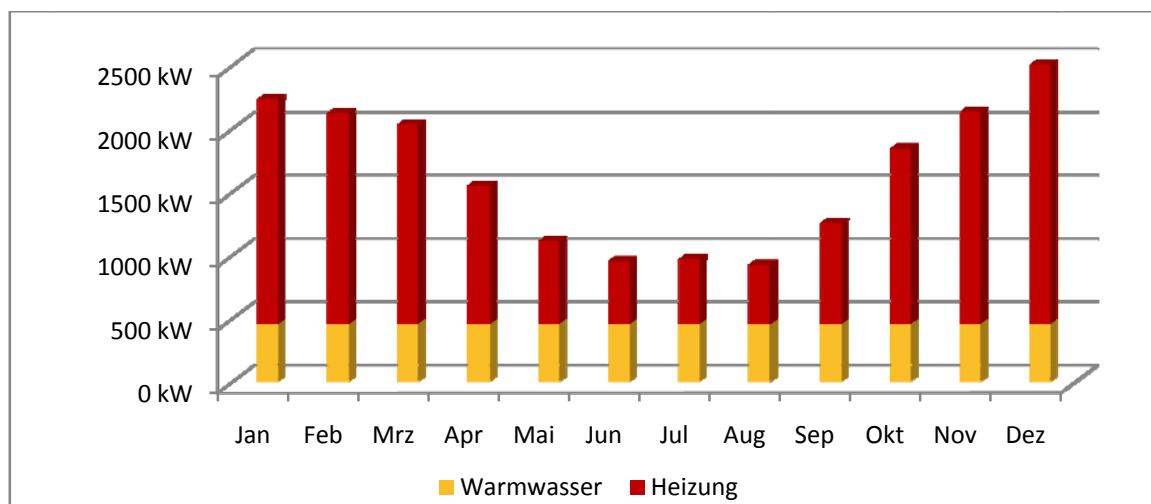


Abbildung 19: Wärmebedarfsverlauf

Zur Erreichung optimaler Ergebnisse ist jedoch die Analyse der stündlichen Verbrauchswerte von enormer Wichtigkeit. Diese zeigen insbesondere Schwankungen des Wärmebedarfs innerhalb eines Tages auf und werden in geeigneter Form als Tageslastgänge dargestellt. Auf Grund, dass dieses Verfahren nur kürzere Zeitintervalle übersichtlich abbildet ist für die Darstellung längere Zeiträume die geordnete Jahresdauerlinie anzuwenden. Die Jahresdauerlinie ist die grafische Auftragung der von einem Objekt benötigten Wärmeleistung gegen die Zeit. Man erhält sie durch die absteigende Sortierung der stündlich erfassten 8.760 Verbrauchswerte. Der höchste Wert entspricht der maximalen Heizlast an den kältesten Tagen im Jahr. Die Fläche unter der Kurve entspricht dem Jahreswärmebedarf und stellt ein ganz wesentliches Element zur Auslegung und Dimensionierung des BHKW dar. Denn anhand des Kurvenverlaufs kann in einem weiteren Planungsschritt die thermische Auslegung eines BHKW erfolgen, wobei die Modulgrößen so gewählt werden müssen, dass sie eine jährliche Mindestlaufzeit von 5000 Betriebsstunden (14) für einen wirtschaftlichen Betrieb erreichen.



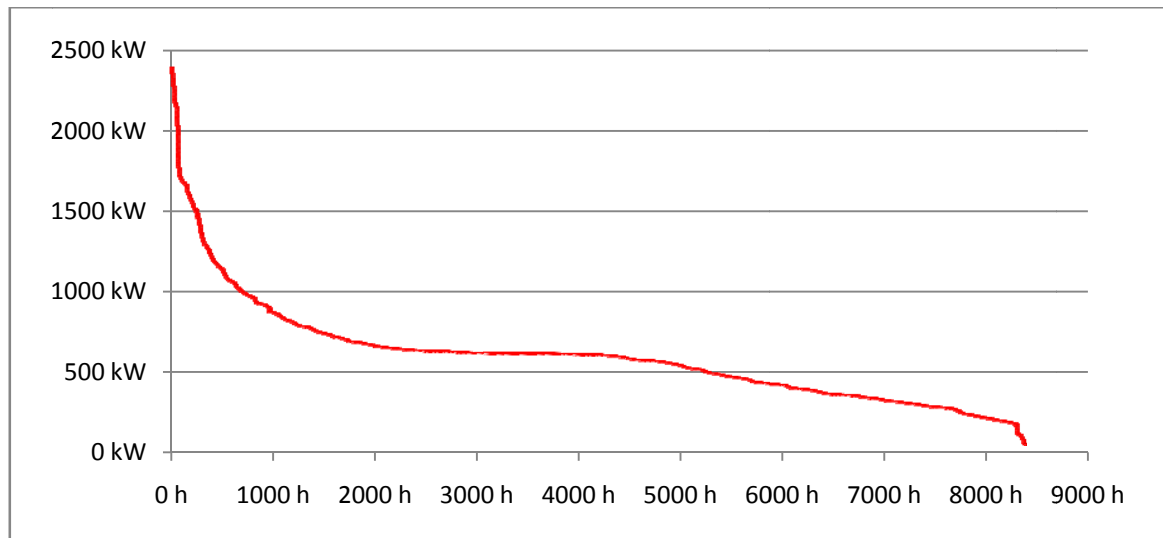


Abbildung 20: Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs

#### 4.1.2 Ermittlung des Strombedarfs

Wie auch bei dem Wärmebedarf liegen grundsätzlich Datensätze des Energieversorgungsunternehmens zur Analyse des Stromverbrauchs eines Objektes vor. Diese unterscheiden sich jedoch in der Qualität, da bei Sondertarifikunden neben der elektrischen Arbeit immer viertelstündlich der Spitzenwert der Leistung protokolliert wird. Eine Disposition in Hoch- und Niedrigtarif ist nur dann vorzunehmen, wenn gemäß des Stromlieferungsvertrags dieses vorgegeben ist. Die Analyse der Verbrauchswerte erfolgt äquivalent dem Wärmebedarf in Tages-, Wochen- und Jahreslastgangkurven und Dauerlinien.

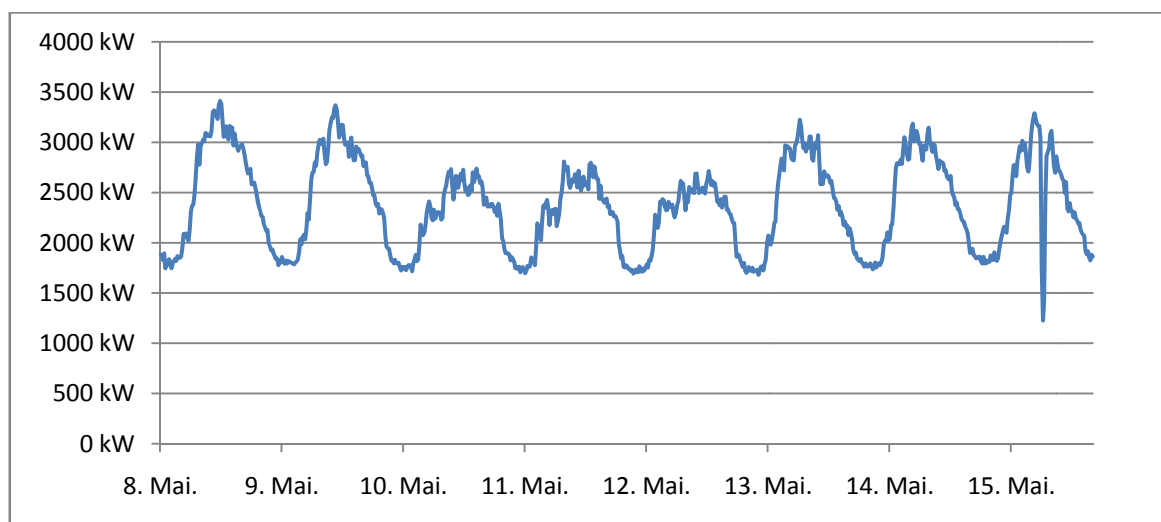


Abbildung 21: Wochenlastgang Strombedarf

## 4.2 Betriebsweisen

Blockheizkraftwerke zeichnen sich durch die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme in einem konstanten Verhältnis aus. Es gibt daher prinzipiell zwei Möglichkeiten, nach denen ein Blockheizkraftwerk (7) ausgelegt und betrieben werden kann. Das sind nach der Höhe und Struktur des Wärmebedarfs, die wärmegeführte und nach der Höhe und Struktur des Strombedarfs, die stromgeführte Betriebsart. Die Regelungs- und Steuerungseinrichtungen eines BHKW ermöglichen es im Allgemeinen jedoch, dass ein BHKW nicht nur nach einer dieser beiden Führungsgrößen zu betreiben ist, sondern auch ein brennstoffgeführter oder netzgeführter Betrieb möglich ist. Hier sollen die wärmegeführte und stromgeführte Betriebsweise, welche die Basis für alle weiteren, gemischten Betriebsweisen bilden, dargestellt werden. Weiterhin können Anlagen, die mit einem zusätzlichen Lastmanagement ausgerüstet sind, im Bedarfsfall sowohl stromgeführt als auch wärmegeführt betrieben werden. Insbesondere müssen diese beiden Betriebsarten möglich sein, wenn das BHKW auch für die Notenergieversorgung eines Krankenhauses vorgesehen ist.

### 4.2.1 Wärmegeführte Betriebsweise

Ziel der wärmegeführten Betriebsweise ist die weitestgehende Abdeckung des Wärmebedarfs. Das BHKW wird leistungsmäßig so geregelt, dass der Wärmebedarf der Liegenschaft soweit wie möglich durch das BHKW oder aus Sicherheitsgründen durch mehrere BHKW-Einzelmodule erzeugt wird. Das BHKW folgt bis zu seiner oberen Leistungsgrenze der Wärmebedarfskurve, der Spitzenkessel deckt den restlichen Wärmebedarf ab. Der vom BHKW gleichzeitig erzeugte Strom wird entweder eigenverbraucht oder gegebenenfalls in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Der Strombedarf während der Stillstandzeiten des BHKW und ein etwaiger Mehrbedarf werden über das Energieversorgungsnetz ausgeglichen. In Abbildung 22 werden die positiven Auswirkungen eines Pufferspeichers auf den BHKW-Betrieb veranschaulicht. Bei absinkender Wärmebedarfskurve wird der Pufferspeicher geladen und ermöglicht so den Weiterbetrieb des BHKW bei Nennlast. Wenn der Pufferspeicher vollständig geladen ist, kann noch die Leistung des BHKW bis zur Schaltgrenze gesenkt werden. Ist auch diese untere

Grenze erreicht, dann wird das BHKW abgeschaltet, und der Wärmebedarf wird über den Pufferspeicher bereitgestellt.

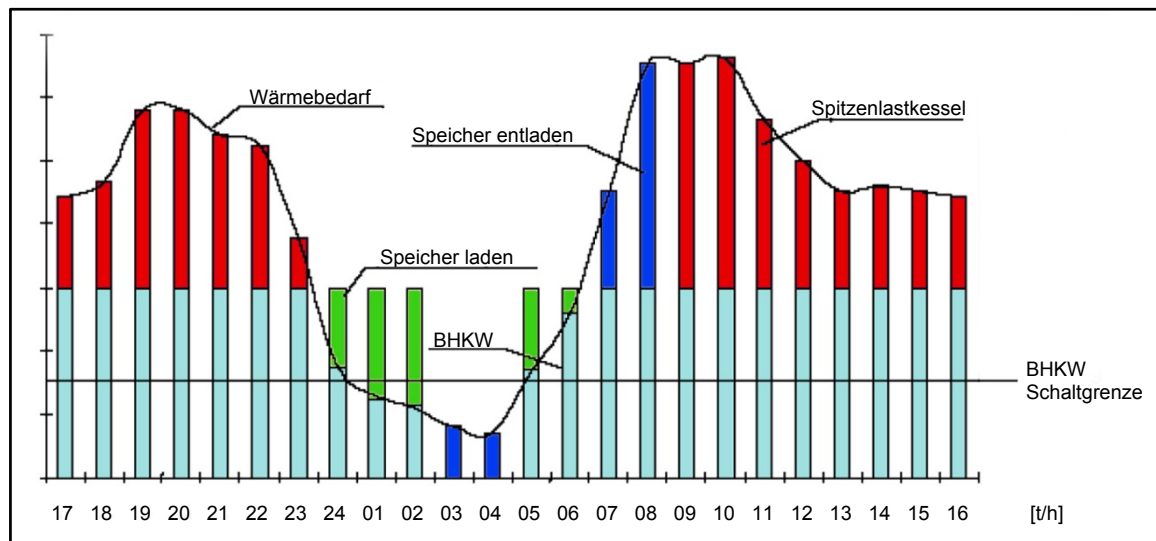


Abbildung 22: Wärmegeführtes BHKW

#### 4.2.2 Stromgeführte Betriebsweise

Der stromgeführte Betrieb zielt auf eine hohe Abdeckung des Strombedarfs hin. Das BHKW wird nach der Stromanforderung geregelt und fährt bis zu seiner oberen elektrischen Leistungsgrenze die Strombedarfskurve ab. Ein erforderlicher Mehrbedarf wird wiederum über das öffentliche Stromnetz ausgeglichen, siehe Abbildung 23. Aus ökologischer Sicht ist diese Betriebsweise nur dann vertretbar, wenn auch die gleichzeitig erzeugte Wärme genutzt werden kann und nicht als überschüssiges Nebenprodukt über Notkühler an die Umgebung abgeführt werden muss. Alternativ kann die Abwärme auch in begrenzten Rahmen dem Pufferspeichern zugeführt werden. Die stromgeführte Betriebsweise findet sich zum einen meist im gewerblichen Bereich, wo das BHKW den zentralen Teil der betrieblichen Stromversorgung bilden kann und hohe Energiebezugskosten vorhanden sind, und zum anderen in Inselnetzen, die vom öffentlichen Stromnetz getrennt sind. Weiterhin hat die hohe Einspeisevergütung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz und die KWK-Förderung dazu geführt, dass immer mehr stromgeführte BHKW, die mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben werden wirtschaftlich und ökologisch hocheffizient arbeiten.

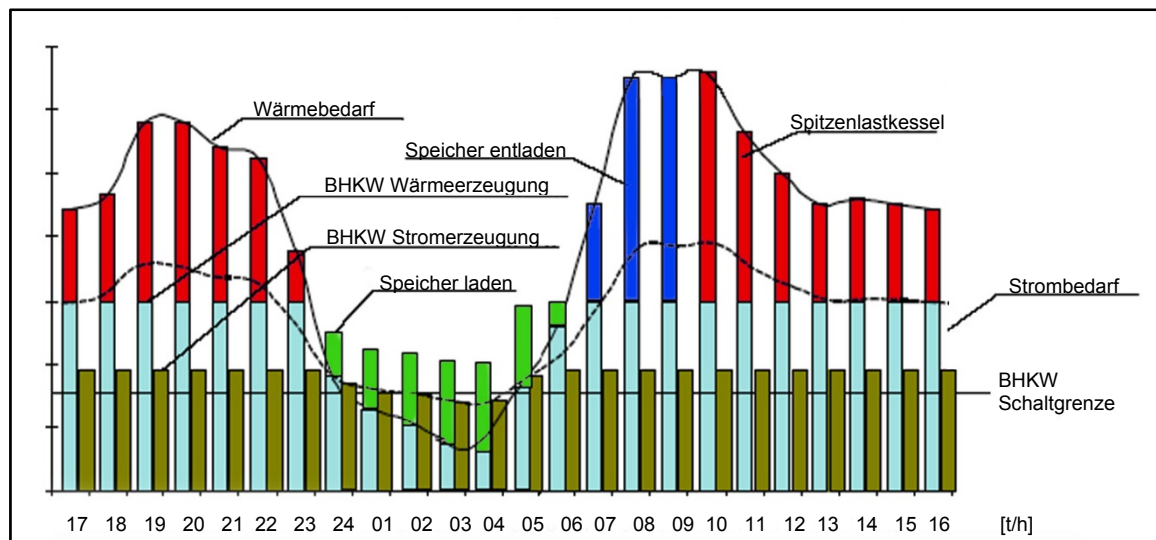


Abbildung 23: Stromgeführtes BHKW

### 4.3 Auswahl und Dimensionierung eines BHKW

Für die Auswahl und Dimensionierung von BHKW sind unterschiedliche Faktoren zu beachten. Nach Festlegung der Betriebsweise erfolgt unter Berücksichtigung der am Standort Verfügbaren Brennstoffe und der Versorgungssicherheit, welche maßgeblich durch der Anzahl der Module beeinflusst wird, die Auslegung des BHKW auf den Grundlastbereich. Das ist jener Lastbereich der in etwa an 4.000 bis 7.000 Stunden im Jahr auftritt und somit die für einen wirtschaftlichen Betrieb notwendigen 5000 Betriebsstunden gewährleistet. Ausgehend von der Jahresdauerlinie erfolgt die Größenwahl der BHKW-Aggregate entsprechend den anvisierten Betriebsstunden. Dabei ist es jedoch von Interesse, dass ein wirtschaftliches Optimum zwischen der sehr investiven KWK-Anlagenleistung und der Leistung der moderaten konventionellen Spitzenlastkesselanlage gefunden werden muss.

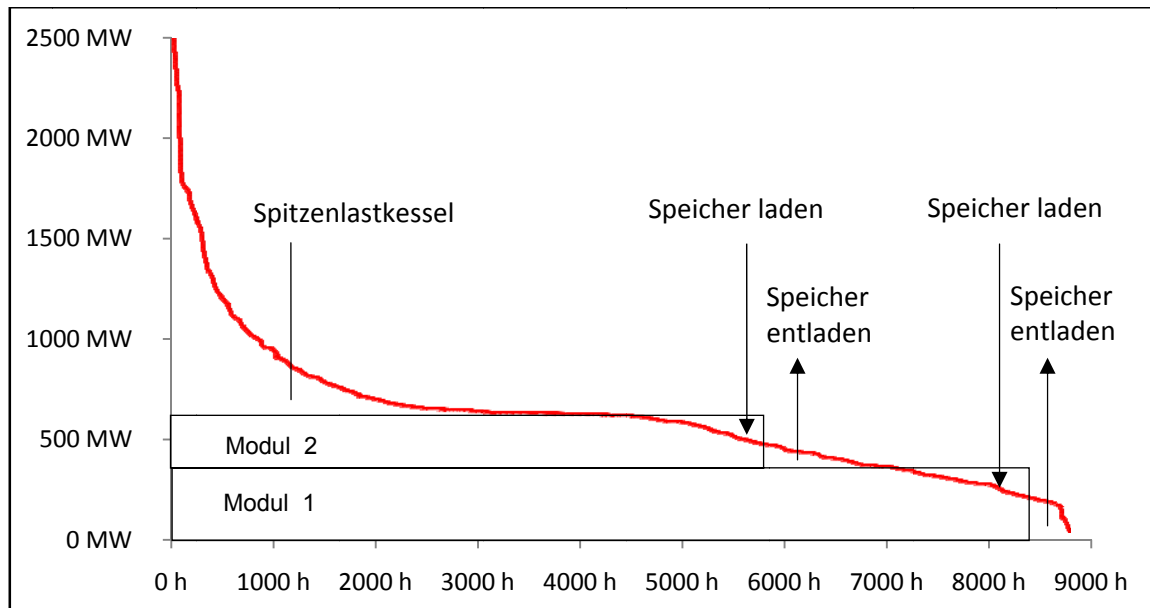


Abbildung 24: Bestimmung der Vollaststunden einzelner BHKW Module

In der Abbildung 24 ist die Wärmebedarfsdeckung in der geordneten Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs dargestellt. Ein BHKW mit einer Leistung von 15 % der thermischen Höchstlast erreicht eine Laufzeit von ca. 8.200 Stunden. Damit deckt es etwa 52 % des Gesamtwärmebedarfs. Ein zweites Modul mit ca. 8% der Leistung würde noch etwa 5.600 Vollaststunden aufweisen und damit weitere 28% des Wärmebedarfs bereitstellen. Ein großes BHKW mit einer Leistung von 30 % der thermischen Höchstlast würde im betrachteten Fall eine Laufzeit von 4.000 Stunden erreichen und ca. den gleichen Anteil an Wärme bereitstellen wie ein Aggregat mit der halben Leistung. Aus diesem Beispiel wird der Zusammenhang ersichtlich, dass bei einer Auslegung auf die Grundlast die Laufzeit und die gelieferte Wärmemenge hoch sind, auch wenn die Wärmeleistung des BHKW gemessen am maximalen Wärmeleistungsbedarf klein ist. Als Faustformel ist zu verinnerlichen, dass eine BHKW-Wärmeleistung zwischen 10 und 20 % der thermischen Höchstlast des Objektes bereitstellen sollte. Die verbleibenden 80 bis 90% sind durch den Heizkessel zu erzeugen. Bei einer zu projektierenden Krankenhauswärmeversorgung ist zu untersuchen, ob der Heizkessel als Notfallversorgung bei Ausfall des BHKW Anwendung finden soll und folglich auf den gesamten Wärmebedarf als Spitzenlastkessel auszulegen ist.

### 4.3.1 Berücksichtigung der gesetzlichen u. umweltrelevanten Vorschriften

Voraussetzung für den Betrieb eines BHKW ist die Einhaltung energierechtlicher Gesetze und Vorschriften. Dessen Inhalte dienen zum einen dem Schutz der Allgemeinheit vor den Gefahren von Industriellenanlagen und zum anderen sind in Ihnen die Vergünstigungen und die Höhe der Vergütungsansprüche der Anlagenbetreiber geregelt.

Im Rahmen des Genehmigungs- und Anzeigeverfahren von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen sind nachstehende gesetzliche und umweltrelevante Vorschriften zu beachten:

- Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)
- Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)
- Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm)
- Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)
- Energieeinsparungsgesetz (EnEG)
- Drittes Verstromungsgesetz (3. VerstrG)
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG)
- Verordnung über Gashochdruckleitungen (GasHL-VO)
- Landesbauordnung (LBO)
- Mineralölsteuergesetz
- VDEW-Richtlinien für den Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen
- Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das NS-netz
- Wärmeschutz- und Wärmenutzungsverordnung
- EU-Richtlinien
- Sicherheitsanforderungen
- Bestimmungen und Bedingungen des örtlichen EVU

Für die Planung und der Wirtschaftlichkeitsberechnung sind die dafür vorgesehenen Normen und Richtlinien wie z. B. die Richtlinie des Vereins deutscher Ingenieure 2067, Blatt 1 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung“ (19) und die VDI-Richtlinie 3985 „Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Verbrennungskraftmaschinen“ (18) heranzuziehen. Sie vermitteln einen neutralen

Überblick über Technik und Randbedingungen für den Einsatz von Verbrennungsanlagen und sind gleichzeitig ein Leitfaden für den Kostenvergleich von KWK-Anlagen zur konventioneller Wärme- und Stromverzeugung.

Für den wirtschaftlichen Erfolg von KWK-Anlagen sind die Gesetze, wie das KWK-Gesetz (KWKG 2009) bei Einsatz von Heizöl, Erdgas und Flüssiggas sowie das Energiesteuergesetz (EnergieStG) mit der daraus ableitbaren Rückvergütung für die Mineralölsteuer und Stromsteuer von entscheidender Bedeutung. Beim Einsatz von Biomasse, wie zum Beispiel Pflanzenöl, Biogas und Holz sind derzeit die Bestimmungen des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) maßgebend. Ab dem Jahre 2009 ergeben sich durch das Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – EEWärmeG) weitere Vergütungsmöglichkeiten.

#### **4.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung**

Die Energieversorgung von Objekten erfolgt im Allgemeinen durch konventionelle Heizungsanlagen zur Wärmebereitstellung und Strombezug aus dem öffentlichen Netz. Im Vergleich dazu muss vor dem Einsatz eines kostenintensiveren KWK-Systems Aussagen zur Wirtschaftlichkeit getroffen werden. Daher stellt die ökonomische Betrachtung der Versorgungssysteme ein wesentliches Kriterium bei möglichen Entscheidungen für KWK-Anlagen dar.

##### **4.4.1 Investitionsrechnung**

Das Charakteristische an Investitionen ist, dass dadurch Zahlungsströme generiert werden und die finanziellen Mittel längerfristig gebunden sind. Zur Bewertung der finanziellen Auswirkung einer Investition können verschiedene Rechenverfahren herangezogen werden. Man unterscheidet dabei zwischen statischen (einperiodische) und dynamischen (mehrperiodische) Verfahren der Investitionsrechnung (5).

Statische Verfahren

- Kostenvergleichsrechnung
- Gewinnvergleichsrechnung
- Statische Amortisationsrechnung
- Rentabilitätsrechnung

Dynamische Verfahren

- Annuitätenmethode
- Kapitalwertmethode
- Interne Zinsfuß-Methode
- Dynamische Amortisationsdauer

Da alle Verfahren nicht überall Anwendung finden können, gilt im Allgemeinen bei den statischen Verfahren als nachteilig, dass die zeitliche Struktur der Zahlungen nicht berücksichtigt wird. Es wird nicht unterschieden, ob Zahlungen bereits heute oder beispielsweise erst in fünf Jahren anfallen. Weiterhin ist bei den unterschiedlichen Methoden darauf zu achten, in welchem Verhältnis der Aufwand für die Beschaffung der notwendigen Daten und für die Durchführung der Berechnung zur Genauigkeit der Ergebnisse steht. Falls zahlreiche benötigte Werte auf Annahmen beruhen, erscheinen sehr detaillierte Verfahren nicht zielführend.

**4.4.2 Annuitätenmethode**

Im Rahmen dieses Abschnitts wird vorzugsweise auf die Annuitätenmethode eingegangen. Durch den Ausweis von jahresbezogenen Kosten und Erlösen, unter Berücksichtigung der künftigen Preissteigerung und Teuerungsrate des Geldwertes, sind diese Berechnungen insbesondere auch für nicht Betriebswirtschaftler verständlich. Darüberhinaus ist dieses gut nachvollziehbare Verfahren in der VDI-Richtlinie 2067, Blatt 1 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung“ (19) mit einem umfassenden Katalog von Kosten- und Erlösparametern beschrieben.

Bei dem dynamischen Verfahren, der Annuitätenmethode werden alle mit einem Investitionsobjekt verbundenen Zahlungen gleichmäßig auf die Nutzungsdauer verteilt und somit wird es ermöglicht, dass einmalige Zahlungen / Investitionen und laufende Zahlungen mit Hilfe des Annuitätsfaktors während eines Betrachtungszeitraumes zusammengefasst werden können. Die Auszahlungen entsprechen den Kosten und werden in einmaligen Zahlungen und laufende Zahlungen unterteilt. Daraus ergeben sich Kapitalgebundene, Bedarfsgebundene, Betriebsgebundene und Sonstige Kosten.



Je nach KWK-Anlage können Einzahlungen in gleicher Weise wie die oben genannten Auszahlungen entstehen. Das gilt besonders für kapitalgebundene Einzahlungen, wenn zum Beispiel Zuschüsse oder Förderungen für die Investitionen gewährt werden, oder auch für steuerliche Vergünstigungen. Die Differenz aus der Einzahlungsannuität und der Auszahlungsannuität ergibt die Gesamtannuität. Blockheizkraftwerke im kleinen Leistungsbereich werden in der Regel nicht auf das Ziel, Gewinne zu erwirtschaften, ausgelegt. Daher gilt die Entscheidungsregel, dass die günstigste Anlage jene ist, die die wenigsten Kosten verursacht.

#### 4.4.3 Kosten- und Einnahmenübersicht

Im Gegensatz zu den meisten investiven Baumaßnahmen sind bei einer KWK-Anlage nicht die Kosten für die Anlagenrealisierung entscheidend sondern es spielen in erheblichen Maße die durchschnittlichen Betriebs- und Wartungskosten sowie die durch den Strom- und Wärmeverkauf realisierten bzw. eingesparten Erlöse eine maßgebliche Rolle. Dadurch werden derartige Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen sehr komplex.

Die Kosten und Erlöse setzen sich im Einzelnen wie folgt zusammen:

##### Kapitalgebundene Kosten

- Investitionen
- Zinsen
- Abschreibungen

##### Verbrauchsgebundene Kosten

- Brennstoffkosten
- Hilfsenergiekosten

##### Erzeugungserlöse

- KWK-Bonus
- NawaRo-Bonus
- Technologie-Bonus
- Grundvergütung gemäß EEG
- Erlöse aus Stromeinspeisung
- Vermiedene Strombezugskosten
- Vermiedene Wärmebezugskosten
- Rückerstattung Energiesteuer
- Rückerstattung Stromsteuer

Betriebsgebundene und sonstige Kosten

- Instandhaltung einschließlich Betriebsstoffe
- Reserveleistungskosten
- Bedienung / Personalkosten
- Maschinenversicherung
- Ausfallversicherung
- Verwaltungskosten-Anteil

**4.4.4 Sensitivitätsanalyse**

In einer Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf den wirtschaftlichen Erfolg einer Investition untersucht. Dabei lassen sich die real bestehenden Gefahren und Unsicherheiten bewerten, die aus wirtschaftlicher Sicht bei der Anlagenauswahl und dem Betrieb die größten Auswirkungen aufweisen und folglich in der Planung besonders berücksichtigt werden müssen. Aspekte zu der Versorgungssicherheit und den Emissionen müssen dabei ebenso betrachtet werden wie die nachstehenden technischen und ökonomischen Einflußgrößen. Wird die Wirtschaftlichkeit des BHKW durch eine realitätsnahe prozentuale Variation der einzelnen Parameter unwesentlich beeinträchtigt, kann das Ergebnis als verlässlich angesehen werden.

Technische Einflußgrößen

- Investitionskosten
- Wartungskosten
- Vollaststunden
- Wirkungsgrade

ökonomische Einflußgrößen

- Abschreibungszeitraum
- Kalkulationszins
- Umsatzsteuern
- Strombezugskosten
- Stromverkaufserlöse
- Brennstoffkosten

## 5 Energiewirtschaftliche Analyse des BHKW - Einsatzes im UKJ

Aufbauend auf die vorangegangenen Kapitel soll innerhalb dieses Teils der Arbeit der mögliche Einsatz eines BHKW im Universitätsklinikum Jena unter technischen, wirtschaftlichen und klimatechnischen Gesichtspunkten untersucht werden. Das Universitätsklinikum Jena mit 26 Kliniken, 1375 Betten und 25 Instituten ist eine Einrichtung der Maximalrankenversorgung für über eine Million Bürger in der Region. Des Weiteren ist das UKJ nicht nur führend in Forschung und Lehre sondern auch größter Arbeitgeber in Thüringen mit ca. 4.300 Beschäftigten. Jährlich werden ca. 51.000 Patienten stationär betreut und über 160.000 ambulante Konsultationen durchgeführt. Diese enormen Ausmaße erforderten ein Energieversorgungssystem mit hoher Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit, das einen reibungslosen Klinikbetrieb zu jederzeit gewährleistet.



Abbildung 25: Universitätsklinikum Jena - Lobeda 1.BA

Diesem Anspruch gerecht zu werden plant das Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr und das UKJ seit 1995 ein Neubauvorhaben, welches die Zentralisierung der derzeit auf mehrere Standorte verteilten klinischen Einrichtungen am Standort Jena Lobeda zum Ziel hat. Nach Fertigstellung des 1. Bauabschnittes im Jahre 2004 soll im Rahmen der Planung des 2. Bauabschnittes nach Möglichkeiten einer nachhaltigen und kosteneinsparenden Energieversorgung gesucht werden. Grundlegend sind dabei die Prinzipien des ökologischen Einsatzes wertvoller Ressourcen mit einer hohen Versorgungssicherheit der Energiesysteme zu verbinden. Die ständige Verfügung aller Medien steht in einem universitären Krankenhaus an erster Stelle und muss mit den dafür notwendigen Redundanzen in alle weiteren Planungsschritte einfließen.

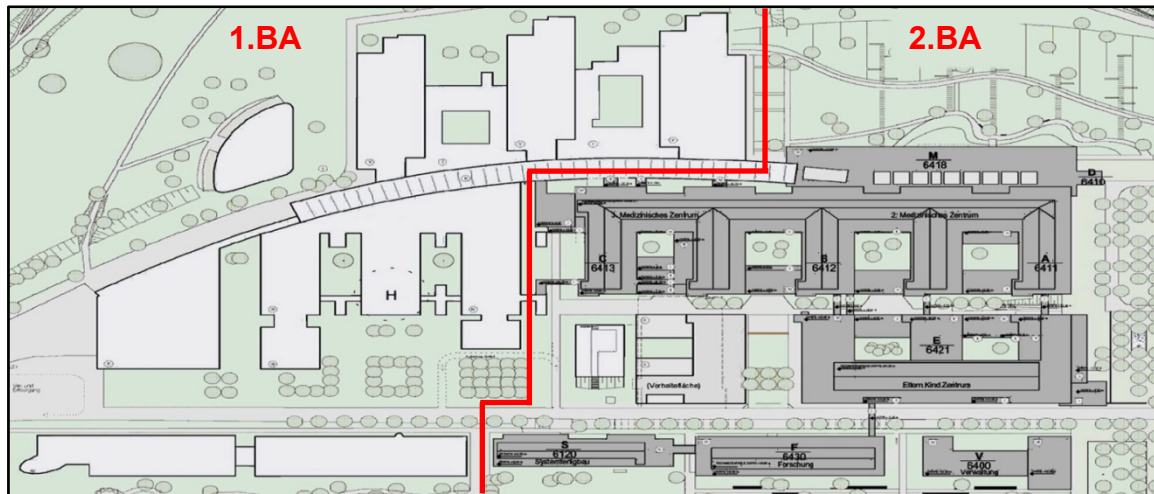


Abbildung 26: Bauabschnittsübersicht

Beginnend mit einer umfassenden Beschreibung der vorhandenen Medien und Strukturen im Klinikum Lobeda 1.BA erfolgt im Weiteren, in Anlehnung an die VDI 3985, die Ermittlung der erforderlichen Bedarfs- und Verbrauchswerte der Energieträger Wärme, Kälte und Strom für das gesamte Versorgungsgebiet (1. BA und 2. BA). Nach der Analyse aller relevanten Parameter der unterschiedlichen Energiearten und Konstruktion der signifikanten Jahresdauerlinien werden Aussagen zur Dimensionierung und Auswahl eines BHKW getroffen. Auf Grundlage dieser wird abschließend eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt. Auf die ökologischen und gesetzlichen Randbedingungen, die prinzipiell bei allen Anlagen in Deutschland gleichermaßen zu beachten und einzuhalten sind wird bis auf die KWK-Zuschüsse nicht weiter eingegangen.

### 5.1 Bestandsanalyse der Energiearten und Strukturen im 1. BA

Im Bereich Lobeda finden für die Bereitstellung der notwendigen Medien unterschiedliche Anlagenkonzepte ihre Anwendung. Ausschließlich werden in den Energieschwerpunkten Wärme in Fernwärmeübergabestationen, Kälte mit Kompressoren und Dampf für die Raumluftechnischen-Anlagen dezentral erzeugt. Im Gegensatz dazu wird der Prozessdampf für Küche und Sterilisation über zwei HDD-Kessel zentral zur Verfügung gestellt. Die elektrische Energieversorgung erfolgt über eine Haupteinspeisung für das gesamte Versorgungsgebiet aus dem öffentlichen Netz und wird über einen Mittelspannungsring verteilt.

### 5.1.1 Strom

#### 5.1.1.1 Installierte Leistung, installierte Anlagen

Das UKJ verfügt am Standort Lobeda über einen eigenen 20 kV Mittelspannungsring indem 6 Trafostationen als Energieschwerpunkte integriert sind und eine Scheinleistung von ca. 12 MVA, mit insgesamt 15 Transformatoren 20/0,4 kV bereitstellen. Von diesen Energieschwerpunkten werden auch die Objekte mit kleinerem Energiebedarf versorgt. Die öffentliche Versorgung des Mittelspannungsringes ist über zwei getrennte Einspeisungen von dem Netz der Stadtwerke Jena-Pößneck GmbH realisiert. Bei Ausfall einer Einspeisung wird automatisch auf die zweite Einspeisung umgeschaltet. Bei Ausfall beider öffentlichen Einspeisungen stehen zur Aufrechterhaltung des Klinikbetriebes 5 dezentrale Notstromaggregate mit einer Gesamtscheinleistung von 5,8 MVA zur Verfügung. Das Leitungsnetz ist Redundant als Allgemeinstromversorgungs- und als Sicherheitsstromversorgungsnetz über die Niederspannungshauptverteilung, Gebäudehauptverteiler und den Bereichsverteilen bis zur Steckdose aufgebaut. Zusätzlich zu diesen zwei Stromversorgungen stehen zentrale unterbrechungsfreie batteriegestützte Stromversorgungsanlagen (BSV-Anlagen) für die Aufrechterhaltung von lebenswichtigen medizinischen und technischen Einrichtungen zur Verfügung. Der Leistungswert der zahlreichen BSV-Anlagen beläuft sich auf ca. 700 kVA. In den Abb. 27, 28 und Tabelle 2 sind die jeweils versorgten Bereiche der Trafostationen und der Notstromanlagen inklusive derer Leistungen dargestellt.

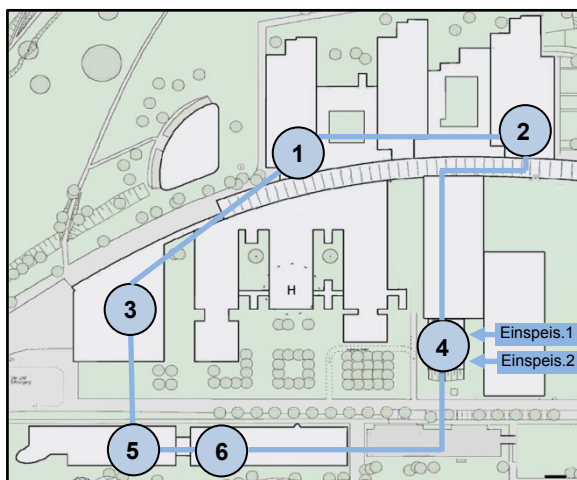


Abbildung 27: Übersicht Mittelspannungsring

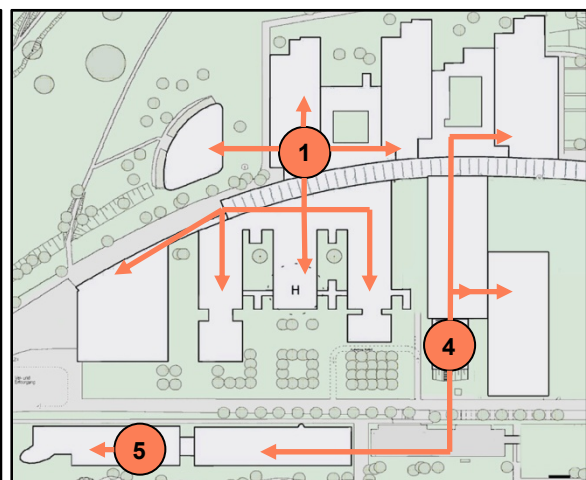


Abbildung 28: Übersicht Notstromaggregate

Nr.	Standort	AV-Leistung	SV-Leistung
1	U/B Nord (UB)	4 x 1200 kVA	2 x 1600 kVA
2	1.Bettenhaus (6242)	2 x 630 kVA	
3	Dienstleistungszentrum (6220)	2 x 630 kVA	
4	Neue Technik-Zentrale (6114)	3 x 630 kVA	2 x 1000 kVA
5	Laborzentrum (6244)	2 x 1000 kVA	1 x 630 kVA
6	Forschungsgebäude (6230)	2 x 1000 kVA	

Tabelle 2: Übersicht der installierten elektrischen Leistungen im 1. BA

### 5.1.1.2 Verbrauchswerte 2009

Zur Analyse und Darstellung der Verbrauchswerte wurden die Energiebezugsdatensätze der Monate Januar bis Dezember 2009 aus der Trafostation NTZ herangezogen. Die Aufschlüsselung der Gebäude spezifischen Stromverbräuche erfolgt im Kapitel Bedarfsanalyse und wird daher hier nur ganzheitlich betrachtet.

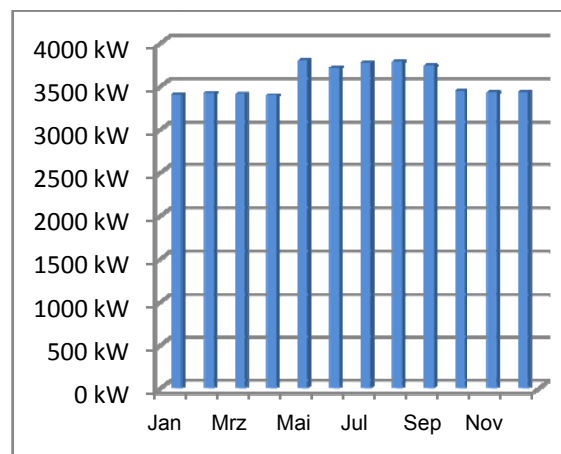
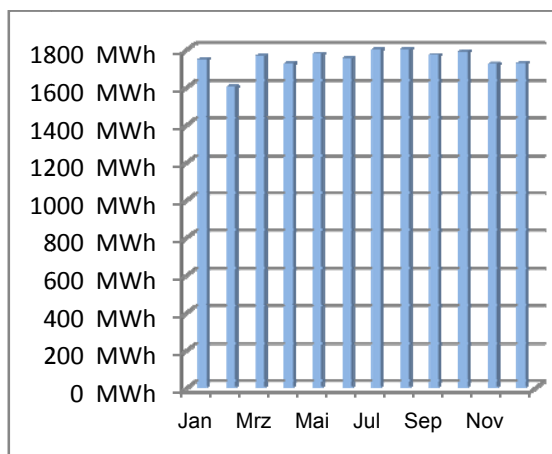


Abbildung 29: Monatliche Stromverbrauchswerte    Abbildung 30: Monatliche Spitzenleistung

Für den Elektroenergiebedarf ergeben sich auf Basis der Jahresbedarfswerte am Hauptzähler folgende Erkenntnisse. Anhand der Jahresdauerlinie, Abbildung 31, lässt sich ermitteln, dass der Grundlastbedarf des UKJ ca. 1,7 MW beträgt. Die Grundlast setzt sich im Wesentlichen aus Verbrauchern wie Lüftungen, Heizungs-, Klimatechnik, Rechenzentren und Beleuchtung, die stets benötigt wird, zusammen. Sie wird nur durch die monatlichen Probelaufe der Notstromaggregate beeinflusst, da sie im Netzparallelbetrieb ein Teil der Verbraucherlast übernehmen.



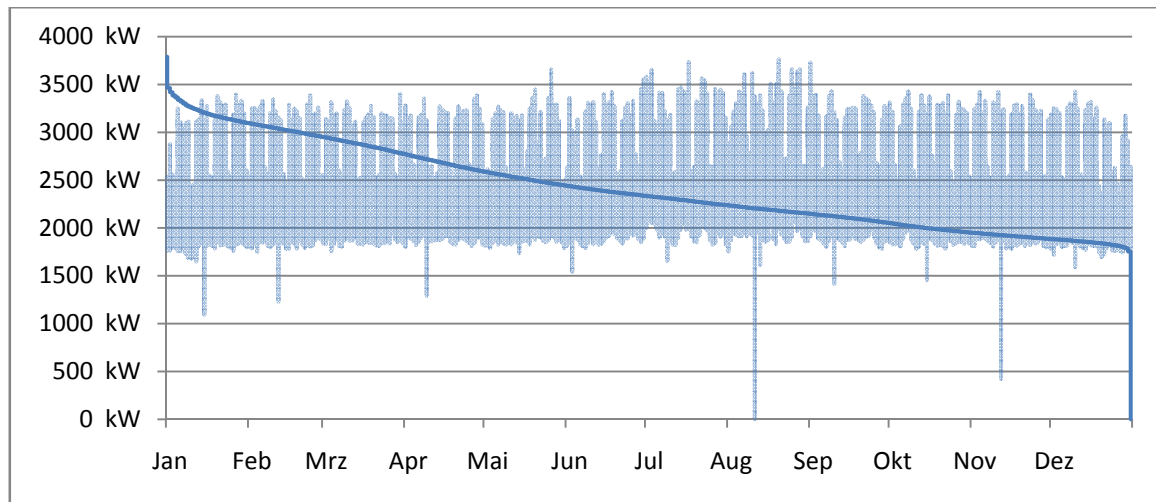


Abbildung 31: Jahresdauerlinie und Jahreslastgang der Stromleistung

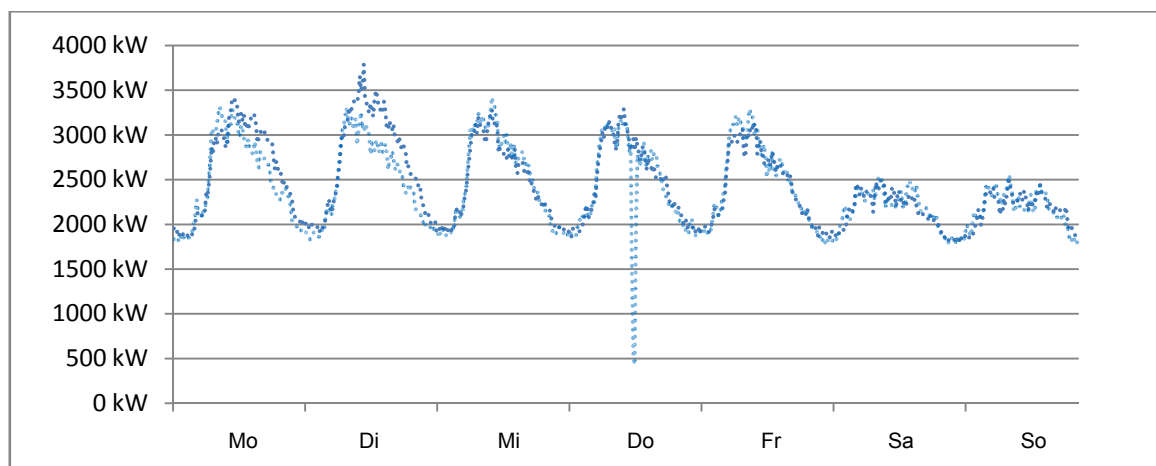


Abbildung 32: Wochenlastgänge Stromleistung - Maximum und Minimum

Die in Abbildung 32 dargestellten Maximum- und Minimum-Wochenlastgänge verdeutlichen die hohe Gleichmäßigkeit des Energiebezuges. Grundsätzlich kann man daher feststellen, dass die zeitlichen Verläufe der Tageslastkurven sowie die monatlichen Verbräuche, über das gesamte Jahr sehr ähnlich sind. Die Variation der Spitzenwerte zwischen 3,4 MW und 3,7 MW in den Sommermonaten Juni bis August begründen sich durch die erhöhten Volllaststunden und den Gleichzeitigkeiten der Kompressionskühlanlagen. Die Divergenzen der Tageslastkurven über dem Grundlastbereich resultieren vor allem aus dem unterschiedlichen Leistungsbedarf an Werktagen und Wochenenden. Durch den reduzierten wochenendlichen Kliniksbetrieb, indem im Allgemeinen mit herabgesetzter Belegschaft gearbeitet wird und nur Notfalloperationen durchgeführt werden, ergibt sich eine Verminderung der Spitzenwerte, um ca. 700 kW.

## 5.1.2 Hochdruckdampf (HDD) / Erdgas

### 5.1.2.1 Installierte Leistung, installierte Anlagen

Die Dampferzeugung und Dampflieferung für die Zentralsterilisation, Küche und Luftbefeuchtung wird durch die Stadtwerke Jena-Pößneck GmbH realisiert. Für diese Zwecke werden in der Technikzentrale im Gebäude 6212, Ebene 30 zwei Hochdruckdampf-Kessel mit jeweils einer Leistung von 1.047 kW vorgehalten. Die gesamte installierte Leistung beläuft sich somit auf ca. 2.100 kW. Im Kontext, dass die Kesselanlage im Jahr 2004 neu errichtet wurde und die Nutzungsdauer entsprechend der VDI-Richtlinie 2067 mit 10 - 15 Jahren bemessen wird, sind keine Ersatzinvestitionen in der weiteren Planungen zu berücksichtigen.

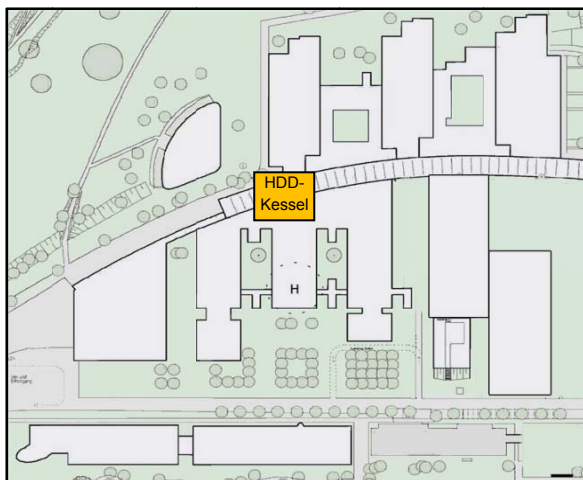


Abbildung 33: HDD-Anlagenübersicht

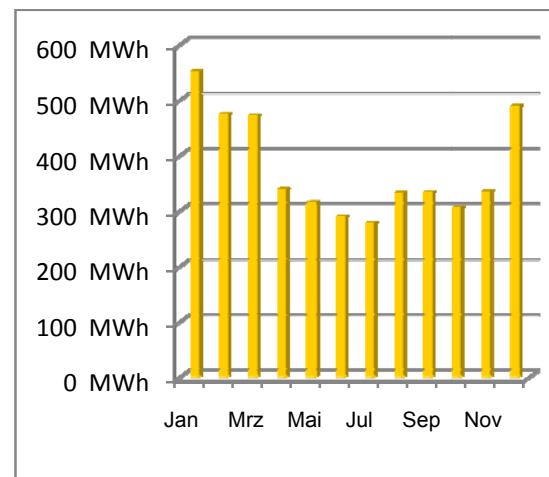


Abbildung 34: Monatlicher HDD-Verbrauch

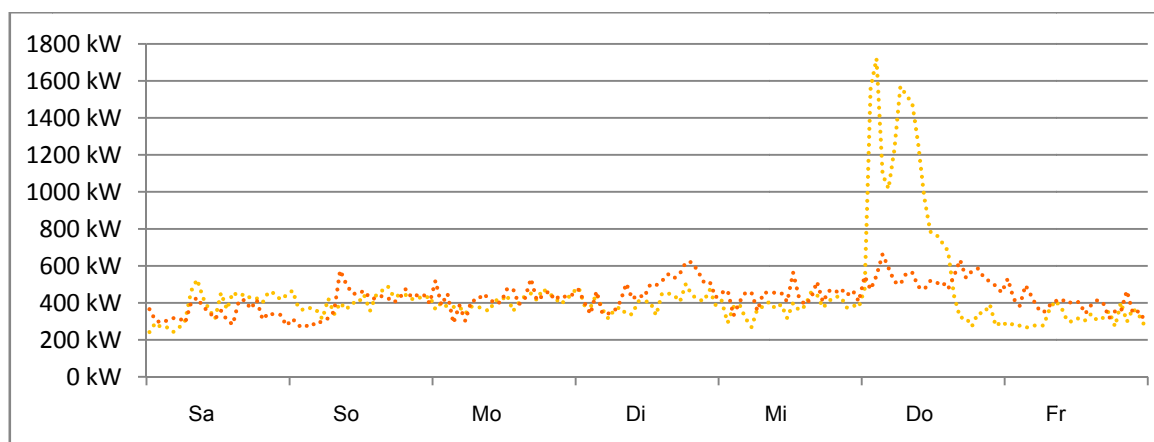


Abbildung 35: Wochenlastgänge HDD-Verbrauch - Maximum und Minimum



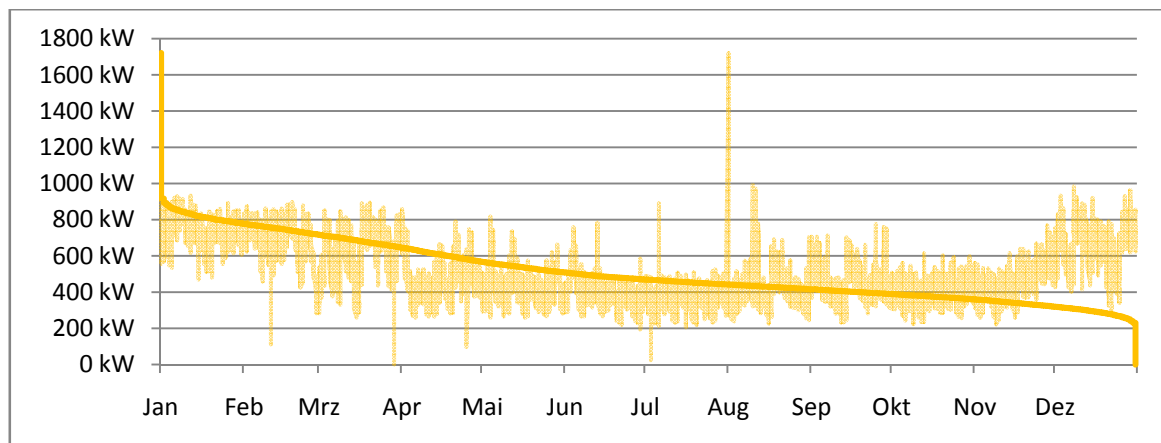


Abbildung 36: Jahresdauerlinie und Jahreslastgang HDD

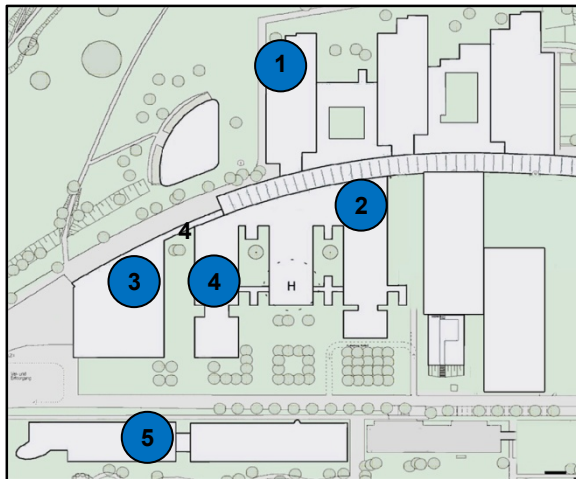
### 5.1.2.2 Verbrauchswerte 2009

Anhand der geordneten Jahresdauerlinie, Abbildung 36, lässt sich ermitteln, dass der Grundlastbedarf des UKJ ca. 260 kW beträgt. Des Weiteren kann aus der Jahresdauerlinie entnommen werden, dass nur 10...15 Stunden im Jahr die geforderte HDD-Leistung die Grenze von ca. 1000 kW überschreitet. Die restliche Zeit wird eine Leistung zwischen 200 ... 900 kW angefordert. Gegenüber dem Stromverbrauch stellt sich auf Basis des monatlichen HDD-Verbrauch, Abbildung 34, eine gänzlich andere Situation dar. Der Unterschied zwischen dem gemittelten Jahresminimum und Jahresmaximum ist im Vergleich zum Elektroenergiebedarf bedeutend größer. Schwankungen im Bereich von 200 bis 800 kW<sub>th</sub> weisen auf einen hohen Anteil des Dampfverbrauches für die Luftbefeuchtung in den Gebäuden 6211, 6212 und 6213 in den kalten Monaten hin. Dabei werden vorwiegend die Operativen- und Intensiv-Medizinischen Einrichtung mit befeuchteter Luft versorgt. Weiterhin kann aus den Wochenlastgängen entnommen werden, dass bis auf den kurzzeitig erreichten Jahresspitzenwert, nur geringe tageszeitliche Unterschiede im HDD-Verbrauch zu verzeichnen sind.

### 5.1.3 Kälte

#### 5.1.3.1 Installierte Leistung, installierte Anlagen

Die im 1. BA bestehende Konzeption der Kälteversorgung basiert auf der dezentralen Erzeugung getrennt nach Prozess- und Klimakälte. Eine Infrastruktur für die zentrale Erschließung der Kälteverbraucher im 1. BA ist nicht gegeben. Die Prozesskälte wird hauptsächlich im Gebäude 6220 zur Nahrungsmittel und Medikamentenherstellung verwendet. Die restlichen Kompressionskältemaschinen finden ihre Anwendung sowohl in der Klimatisierung medizinischer genutzter Räume wie OP's und Intensivbereiche als auch in der Kühlung des klinischen Rechenzentrums.



Nr.	Standort	Leistungen
1	Geb. 6216	1 x 130 kW
2	Geb. 6211	2 x 143 kW
3	Geb. 6220	1 x 214 kW
4	Geb. 6213	2 x 250 kW
5	Geb. 6230	2 x 320 kW

Tabelle 3: Übersicht Kälteleistung 1.BA

Abbildung 37: Standorte Kompressionskältemaschinen

#### 5.1.3.2 Verbrauchswerte 2009

Auf Grund von fehlenden Messeinrichtungen können die Verbrauchswerte nicht benannt, analysiert und dargestellt werden. Der Kälteverbrauch und Kältebedarf wird anhand der spezifischen Kennwerte im nachfolgenden Abschnitt Bedarfsanalyse berechnet. Dabei werden die Informationen über die im Bestand installierten Leistungen berücksichtigt, insbesondere die spezifische Leistungswerte aus den Gebäuden 6220 und 6230. Sehr geringe jährliche Vollbenutzungsstunden - ca. 1.170 h/a - der Kälteanlagen sind durch die Nutzung der Freien Kühlung zu verzeichnen. Bei der Freien Kühlung wird energetisch optimal die Außenluft zur Kühlung des Kühlmediums i.d.R. Wasser verwendet, sobald die Außenlufttemperatur unter den Sollwert der Raumlufttemperatur fällt.

## 5.1.4 Wärme

### 5.1.4.1 Installierte Leistung, installierte Anlagen

Die aktuelle Wärmeversorgung im Bereich Lobeda erfolgt wie bereits erwähnt über das Fernwärmnetz der Stadtwerke Jena. Die notwendige Niedertemperaturwärme zu Heizzwecken und zur Warmwasserbereitung werden wie in Abbildung 38 dargestellt mit einer vereinbarten Gesamtanschlussleistung von 10.204 kW in 10 Fernwärmeübergabestationen bereitgestellt. Die Systemtemperaturen Vor- und Rücklauf belaufen sich auf 130... 90/60...55°C (gleitend).

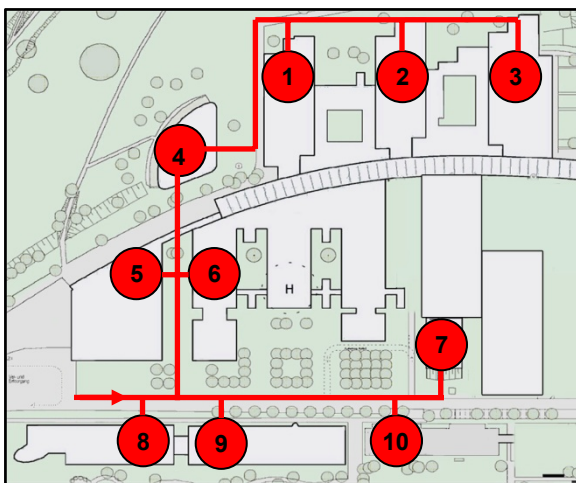


Abbildung 38: Standorte Fernwärmestationen

Nr.	Standort	Leistungen
1	Geb. 6216	480 kW
2	Geb. 6217	845 kW
3	Geb. 6218	1.300 kW
4	Geb. 6219	80 kW
5	Geb. 6230	740 kW
6	Geb. 6213	1.745 kW
7	Geb. 6113	2.626 kW
8	Geb. 6244	1.300 kW
9	Geb. 6240	1.160 kW
10	Geb. 6120	410 kW

Tabelle 4: Fernwärmeanschlußleistung 1.BA

### 5.1.4.2 Verbrauchswerte 2009

Der Jahresfernwärmebedarf i.H.v. 14.900 MWh ergibt sich aus der Summe aller Monatsverbräuche die in Abbildung 39 dargestellt sind. In diesem Balkendiagramm lässt sich gut der Jahreswärmebedarf mit der typischen Senke in den Sommermonaten erkennen.

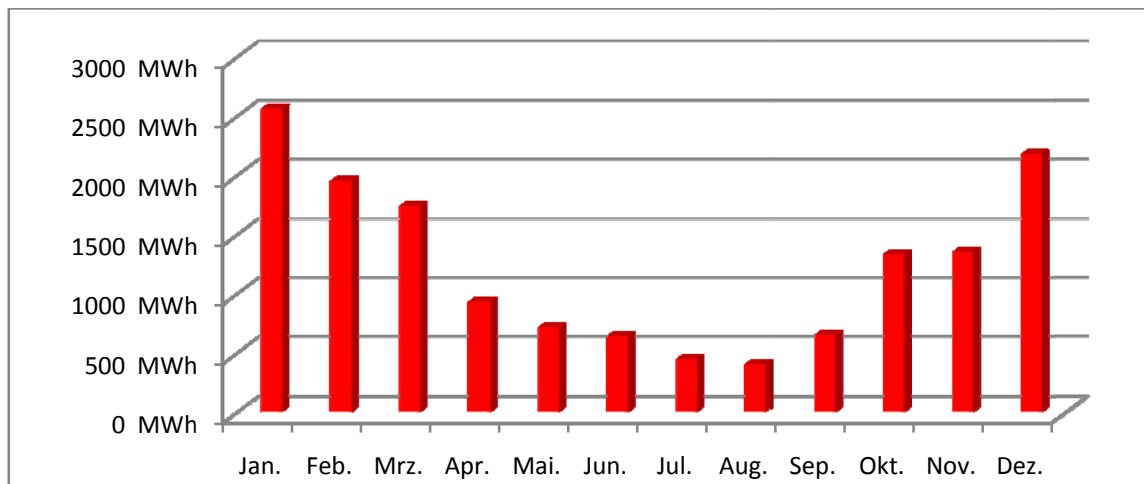


Abbildung 39: Monatlicher Fernwärme-Verbrauch

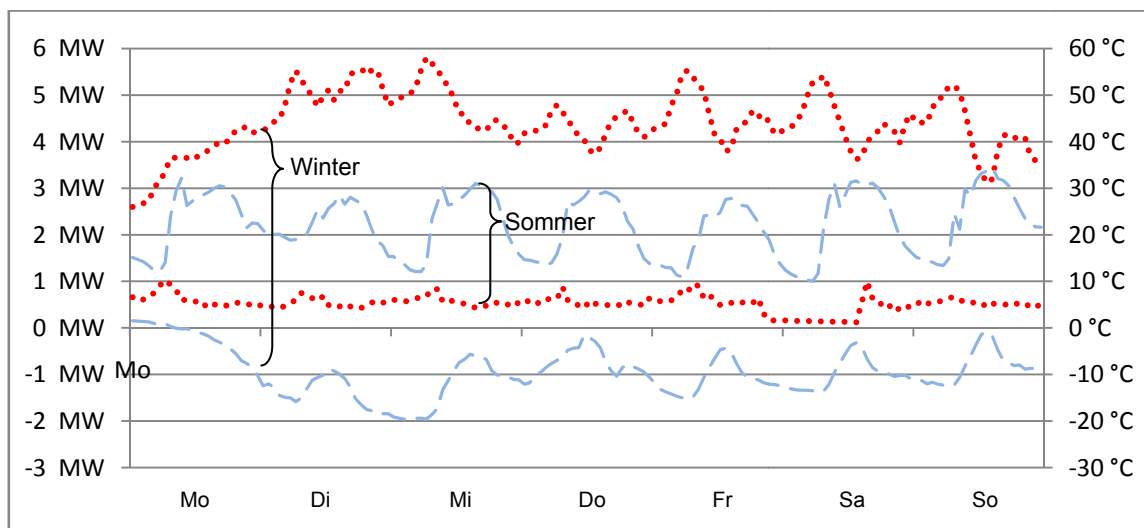


Abbildung 40: Wochenlastgänge Fernwärme-Verbrauch - Maximum und Minimum

Der Vergleich der in der Abbildung 40 dargestellten Wochenlastgänge des Jahresminimums und Jahresmaximums verdeutlicht sehr stark die Witterungsabhängigkeit des Wärmebedarfs. In den sehr warmen Sommertagen, wo keine Heizleistung abgerufen wird, dienen die Fernwärmestation ausschließlich zur Deckung des Warmwasserbedarfs und der Verluste im Wärmenetz. Die benötigte Heizleistung in der kalten Jahreszeit ist funktionell Abhängig zur sinkenden Außentemperatur. Weiterhin zeigen sich nur geringe tageszeitliche Unterschiede im Wärmeleistungsbedarf, wobei die minimalen Steigerung der Leistungsaufnahme in den Vormittagsstunden sich durch der Trinkwarmwasserbereitung erklären. Zusammenfassend kann daher festgestellt werden, dass erhebliche jahreszeitlich

Schwankungen im Bereich zwischen 1 MW und 6 MW bei dem Wärmebedarf zu verzeichnen sind.

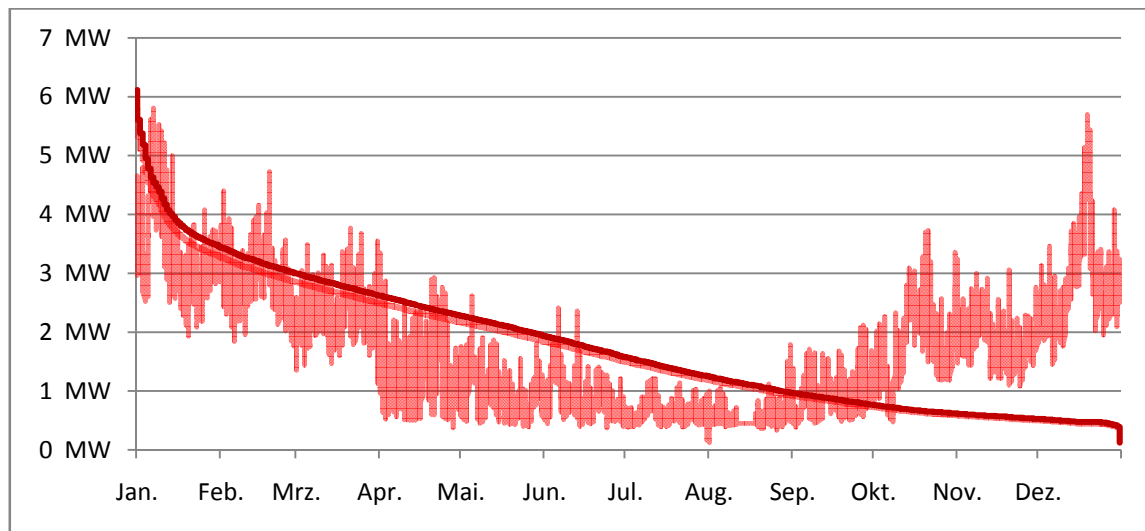


Abbildung 41: geordnete Jahresdauerline Wärme

Um die Entwicklung des Fernwärmeverbrauchs unabhängig vom Einfluss der Außentemperaturschwankungen darstellen zu können, ist es notwendig, die witterungsabhängigen Schwankungen des Energieverbrauchs auszugleichen. Das geschieht durch ein in den VDI-Richtlinien 3807 und 2067 beschriebenen anerkannten Verfahren, welches auf Grundlage der vom Deutschen Wetterdienst ermittelten Gradtagszahl einen Klimakorrekturenfaktor bestimmt. Dabei wird der Heizenergieverbrauch eines jeden Jahres auf das Normaljahr, d.h. den Mittelwert aus den für den jeweiligen Ort gemessenen meteorologischen Werten der vorangegangenen Jahre umgerechnet, so dass die jährlichen Verbrauchsdaten vergleichbar sind. Der so auf der Basis der länderspezifische Gradtagszahl ermittelte Korrekturfaktor beträgt für den Standort Jena bei anzunehmenden 20°C Innentemperatur und 15°C Heizgrenztemperatur, ab der keine Raumheizwärme abgenommen wird, im Jahr 2009 0,95. Die geringen Abweichungen des Witterungsbeinigten Wärmeverbrauchs (dunkelrote Jahresdauerlinie) wurden in Abbildung 41 den tatsächlichen Wärmeverbrauch (rote Jahresdauerlinie) gegenübergestellt.

## 5.2 Bedarfsanalyse

Die Grundlagen für die Vordimensionierung der im nächsten Kapitel vorgestellten Energieerzeugungsanlagenvarianten ist die Zusammenstellung aller signifikanten Bedarfs- und Verbrauchswerte. So werden neben den bekannten Verbrauchswerten auch die Verbrauchswerte von Neuanlagen oder welche sich durch die Substitution von Altanlagen oder durch Rückbau verändern ermittelt. Im Weiteren Verlauf dieser Arbeit erfolgt die Zusammenstellung aller Bedarfswerte anhand von Kennwerten. Diese Kennwerte werden aus den Bestandsdaten (1.BA) gebildet bzw. den einschlägigen Veröffentlichungen wie der VDI Richtlinie 3807 "Energieverbrauchskennwerte für Gebäude" (32) entnommen. Die für die Bedarfsanalyse zu Grunde gelegten Randbedingungen sind der Tabelle 5 und 6 zu entnehmen. Weiterhin findet der Abriss der Gebäude 6160 (NTZ), 6113 Kim – Bettenhaus 4, 6114 Komplement und des Kim Lehrgebäude 6115 im nachstehenden Raumprogramm des 1. und 2. Bauabschnitt Berücksichtigung.

Objekte	Nettogeschoßfläche	Anzahl der Betten
<b>1. Bauabschnitt</b>		
6115 KIM Laborgebäude	2.455 m <sup>2</sup>	
6113 KIM Bettenhaus	12.151 m <sup>2</sup>	-360 Betten
6114 Komplement	7.378 m <sup>2</sup>	
6120 Systemfertigungsbau	3.839 m <sup>2</sup>	
6130 ehem. Dialyse	565 m <sup>2</sup>	
6160 NTZ	445 m <sup>2</sup>	
6211 UB-Süd 1	8.346 m <sup>2</sup>	
6212 UB-Süd 2	8.194 m <sup>2</sup>	
6213 UB-Süd 3	5.421 m <sup>2</sup>	
6214 UB-Süd 4	2.054 m <sup>2</sup>	
6215 UB-Nord 2	3.908 m <sup>2</sup>	
6216 Bettenhaus 3	6.011 m <sup>2</sup>	
6217 Bettenhaus 2	5.997 m <sup>2</sup>	
6218 Magistrale	8.136 m <sup>2</sup>	
6219 Palliativgebäude	1.440 m <sup>2</sup>	12 Betten
6220 Dienstleistungszentrum	6.320 m <sup>2</sup>	
6230 Forschungsgebäude	8.031 m <sup>2</sup>	
6241 Eingangsgebäude	1.103 m <sup>2</sup>	
6242 UB Nord 1	4.741 m <sup>2</sup>	
6243 Bettenhaus 1	6.593 m <sup>2</sup>	
6244 Laborgebäude	6.560 m <sup>2</sup>	
<b>Summe 1. BA</b>	<b>109.688 m<sup>2</sup></b>	<b>816 Betten</b>

Tabelle 5: Raumprogramm 1. Bauabschnitt

Objekte	Nettogeschoßfläche	Anzahl der Betten
<b>2. Bauabschnitt</b>		
Untersuchung Behandlung	24.655 m <sup>2</sup>	
Pflege	31.352 m <sup>2</sup>	731 Betten
Verwaltung	7.024 m <sup>2</sup>	
Soziale Dienste	2.107 m <sup>2</sup>	
Ver- und Entsorgung	1.869 m <sup>2</sup>	
Forschung und Lehre	6.835 m <sup>2</sup>	
Sonstiges	158 m <sup>2</sup>	
<b>Summe 2. BA</b>	<b>74.000 m<sup>2</sup></b>	<b>731 Betten</b>
<b>Gesamtsumme 1. und 2. BA</b>	<b>183.688 m<sup>2</sup></b>	<b>1187 Betten</b>

Tabelle 6: Raumprogramm 2. Bauabschnitt

### 5.2.1 Bedarfswerte und Leistungsdaten Strom

Für die Bildung der Kennwerte der Stromversorgung wurden die Vollbenutzungsstunden und der Flächenspezifische Verbrauch aus dem Bestand des 1. BA ermittelt. Die einzelnen Kennwerte sind im Anhang 2 dargestellt:

- Stromverbrauch im Bestand 21.165 MWh/a
- Gemessener Leistungsbedarf im Bestand 3.790 kW
- Daraus Vollbenutzungsstunden im Bestand 5.586 h/a
- Stromverbrauch im Bestand ohne NTZ 17.723 MWh/a
- Berechneter Leistungsbedarf im Bestand ohne NTZ 3.068 kW
- Bezugsfläche NGF im Bestand ohne NTZ 87.292 m<sup>2</sup>
- Spezifischer Stromverbrauch 190 kWh/m<sup>2</sup> a

Entsprechend den Vorgaben des Raumprogramms für den 2. BA (siehe Tabelle 6) ergibt sich für den 2. BA eine Nettogeschoßfläche (NGF) von 74.000 m<sup>2</sup>. Unter Berücksichtigung der o. g. Kennwerte können folgende Bedarfs- und Leistungsdaten für den 2. BA berechnet werden:

- Stromverbrauch 2. BA ca. 14.061 MWh/a
- Leistungsbedarf 2. BA ca. 2.518 kW

Somit ergibt sich für das UKJ (1. BA und 2. BA):

- Stromverbrauch 1. und 2. BA ca. 31.784 MWh/a
- Leistungsbedarf 1. und 2. BA ca. 5.586 kW

### 5.2.2 Bedarfswerte und Leistungsdaten HDD

Für die Bildung der Kennwerte der Dampfversorgung wurden die Verbrauchswerte aus dem Bestand auf die Bettenzahl des 1. BA bezogen. Die einzelnen Kennwerte sind im Anhang 2 dargestellt.

• Bezugsdampfmenge	3.935 MWh/a
• Bezugsbettenzahl	816 Betten
• Spezifischer Dampfbedarf	4,822 MWh/Bett a
• gemessener Leistungsbedarf im Bestand	1.355 kW
• Spezifischer Leistungsbedarf	ca. 1,66 kW/Bett

Die Vergleichswerte für Krankenhäuser betragen jeweils:

• Spezifischer Dampfbedarf	2,5...5,0 MWh/Bett a
• Spezifischer Leistungsbedarf	2,5...5,0 kW/Bett

Entsprechend den Vorgaben des Raumprogramms für den 2. BA ergibt sich für den 2. BA eine Bettenzahl von 731 Betten. Unter Berücksichtigung der o. g. Kennwerte können folgende Bedarfs- und Leistungsdaten für den 2. BA berechnet werden:

• Dampfbedarf 2. BA	ca. 3.523 MWh/a
• Leistungsbedarf Dampf 2. BA	ca. 1.213 kW

Unter Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors von 0,90 kann für das UKJ (1. BA und 2. BA) mit 1.187 Betten errechnet werden:

• Dampfbedarf 1. und 2. BA	ca. 5.149 MWh/a
• Leistungsbedarf Dampf 1. und 2. BA	ca. 1.773 kW

### 5.2.3 Bedarfswerte und Leistungsdaten Kälte

Es liegen keine Verbrauchswerte für Kälte aus dem Bestand vor. Der Kälteverbrauch und Kältebedarf wird anhand der spezifischen Kennwerte berechnet. Dabei können die Informationen über die im Bestand installierten Leistungen berücksichtigt werden. So können folgende spezifische Leistungswerte aus den Geb. 6220 und 6230 berechnet werden:



- Leistungsbedarf Kälte 71 W/m<sup>2</sup>

Der entsprechende Kältebedarf errechnet sich anhand der Vollbenutzungsstunden, diese betragen für Krankenhäuser mit Nutzung der Freien Kühlung ca. 1.170 h/a. Entsprechend den Vorgaben des Raumprogramms für den 2. BA ergibt sich für den 2. BA eine NGF von 25.400 m<sup>2</sup>. Unter Berücksichtigung der o. g. Kennwerte können folgende Bedarfs- und Leistungsdaten für den 2. BA berechnet werden:

- Kältebedarf 2. BA ca. 1.803 MWh/a
- Leistungsbedarf Kälte 2. BA ca. 1.541 kW

Unter Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors von 0,90 kann für das UKJ (1. BA und 2. BA) errechnet werden:

- Kältebedarf 1. und 2. BA ca. 3.645 MWh/a
- Leistungsbedarf Kälte 1. und 2. BA ca. 3.134 kW

#### 5.2.4 Bedarfswerte und Leistungsdaten Wärme

Für die Bildung der Kennwerte der Wärmeversorgung wurden die Verbrauchswerte aus dem Bestand auf die beheizten NGF des 1. BA bezogen.

- Bezugswärmemenge ohne NTZ 10.317 MWh/a
- Bezugswärmemenge Witterungsbereinigt ohne NTZ 10.588 MWh/a
- Witterungsbereinigung von 2009 0,95
- Bezugsfläche ohne NTZ 87.292 m<sup>2</sup>
- Spezifischer Wärmebedarf 121 kWh/m<sup>2</sup> a
- Gemessener Leistungsbedarf im Bestand ohne NTZ 4.235 kW
- Daraus Vollbenutzungsstunden im Bestand ca. 2.500 h/a

Im Rahmen des Inkrafttretens der Novellierung der Energieeinsparverordnung im Jahr 2009 sind für alle neu zu errichtenden Wohn- und Nichtwohngebäude erhebliche energetische Einsparungen zu realisieren. Der maximal zulässige Jahresprimärenergiebedarf muss um durchschnittlich 30% gesenkt werden sowie der

mittlere Wärmedurchgangskoeffizient bei Nichtwohngebäuden um rund 15 % zu vermindern ist. In Konsequenz dessen, erfolgt zur weiteren Berechnung des Wärmebedarfs des 2. BA die Reduzierung des spezifischen Kennwerts um 15% auf 103 kWh/m<sup>2</sup> a.

Entsprechend den Vorgaben des Raumprogramms für den 2. BA ergibt sich eine NGF von 74.000 m<sup>2</sup>. Unter Berücksichtigung der zuvor genannten Kennwerte können folgende Bedarfs- und Leistungsdaten für den 2.BA berechnet werden:

- Wärmebedarf 2. BA ca. 7.622 MWh/a
- Leistungsbedarf 2. BA ca. 3.049 kW

Unter Berücksichtigung der weitgehend dezentralen Versorgung der einzelnen Unterstationen kann ein Gleichzeitigkeitsfaktor von 1,00 eingesetzt werden, somit ergibt sich für das UKJ (1. BA und 2.BA):

- Wärmebedarf 1. und 2. BA ca. 18.210 MWh/a
- Leistungsbedarf 1. und 2. BA ca. 7.284 kW

Hier wurde die Reduzierung der Bedarfs- und Leistungsdaten im 1. BA durch den Abriss der Geb. 6113, 6114, 6115 und 6160 bereits berücksichtigt.

Anhand der berechneten Leistungsdaten wurde eine Funktion für die Leistungsaufnahme in Abhängigkeit von der Außentemperatur ermittelt. In Abstimmung mit dem Ingenieurbüro Höhn und Herrn Dr. Schmidt, technischer Berater der Bosch Thermotechnik GmbH (20), wurde der berechnete Wärmebedarf des 2. BA im entsprechenden Verhältnis der geordneten Jahresdauerline Wärme des 1. BA aufgesetzt. Der damit berechnete Lastgang für das UKJ (1. und 2. BA) ist Grundlage für die Dimensionierung der im nächsten Abschnitt betrachteten Versorgungsvarianten.

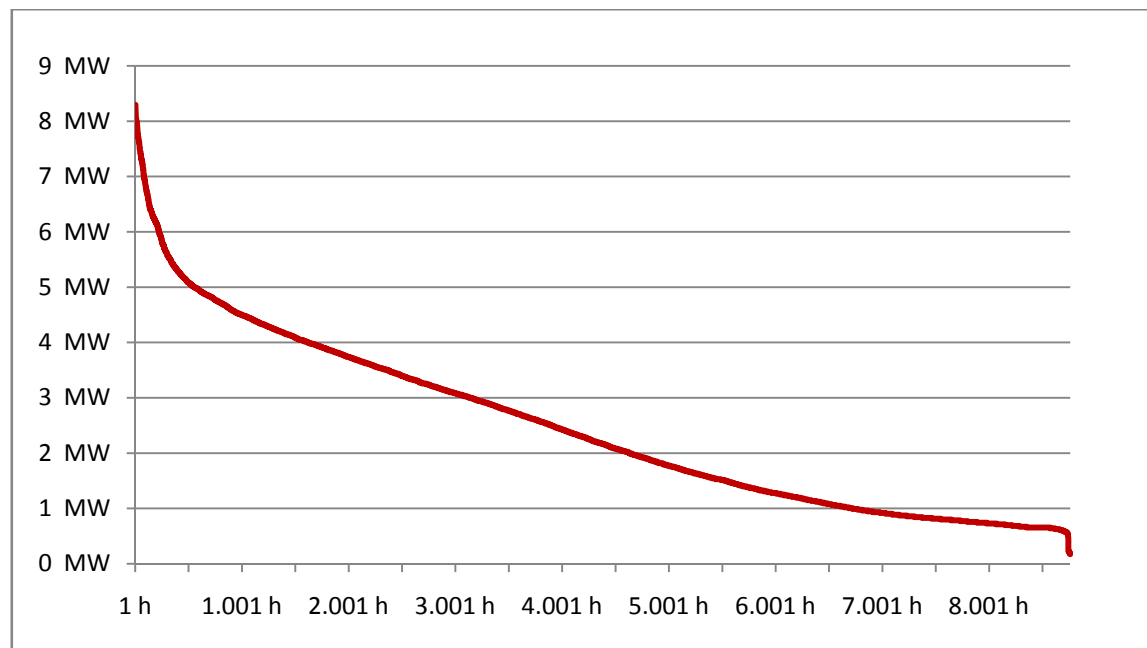


Abbildung 42: geordnete Wärmebedarfsjahreslinie 1. und 2. BA

### 5.2.5 Zusammenfassung der Bedarfswerte und Leistungsdaten

Nachfolgend sind in der Tabelle 7 die Ergebnisse der Bedarfsanalyse zusammengefasst.

Energiearten	1.BA	2.BA	GZF	Gesamt
Anschlussleistung Strom	3.068 kW	2.518 kW		<b>5.586 kW</b>
Strombedarf in	17.723 MWh/a	14.061 MWh/a	1	<b>31.784 MWh/a</b>
Anschlussleistung HDD	1.355 kW	1.213 kW		<b>1.773 MWh/a</b>
HDD-Bedarf	3.935 MWh/a	3.523 MWh/a	0,9	<b>5.149</b>
Anschlussleistung Kälte	1.770 kW	1.541 kW		<b>3.134 kW</b>
Kältebedarf	2.047 MWh/a	1.803 MWh/a	0,9	<b>3.645 MWh/a</b>
Anschlussleistung Wärme	4.235 kW	3.049 kW		<b>7.284 kW</b>
Wärmebedarf	10.588 MWh/a	7.622 MWh/a	1	<b>18.210 MWh/a</b>

Tabelle 7: Zusammenfassung der Bedarfswerte

### 5.3 Konzepterstellung und Auslegung der Versorgungsvarianten

#### 5.3.1 Potentialanalyse und Variantenvorauswahl

Die Konzepterstellung ist laut VDI 3985 in erster Reihe mit der Untersuchung der möglichen Energiequellen verknüpft. Am Standort Lobeda sind neben den etablierten Energieträgern wie Strom und Fernwärme auch Heizöl, Erdgas, und die regenerativen Energieträger wie Biogas und Hackschnitzel auf ihre Einsatzmöglichkeiten zu analysieren. Die Potentialanalyse der möglichen Energiequellen und der darauf basierten Varianten der Energieversorgung wird mit Einsatz einer Nutzwertanalyse durchgeführt. Ziel dieser Nutzwertanalyse mit der sich ergebenden Rangfolge ist es, die Vor- und Nachteile der BHKW-Lösung gegenüber den anderen Energieversorgungskonzepten darzustellen.

Die Nutzwertanalyse basiert auf einer Reihe von Bewertungskriterien. Mit der Machbarkeit wird die Verfügbarkeit und die Integration des zu untersuchenden Energieträgers in das Versorgungskonzept und die rechtlichen Rahmenbedingungen zur Nutzung des zu untersuchenden Energieträgers bewertet. Weiterhin muss bewertet werden ob der untersuchende Energieträger eine ausreichende Versorgungssicherheit für die sekundären Energieträger gewährleistet. Mit der Flexibilität gegenüber Strukturkonzepten soll der Handlungsspielraum innerhalb der infrastrukturellen Konzeption bewertet werden. Hierbei spielen Fragestellungen wie Zentralisierungsgrad und Anbindungsaufwand eine wesentliche Rolle. Der Innovationsgrad gibt zum Einsatz von innovativen Technologien Aussagen, die das positive Erscheinungsbild des Universitätsklinikums in der Öffentlichkeit, durch die Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, erhöhen.

Folgende Energieträger und Energieversorgungsvarianten werden in tabellarischer Form bewertet:

- Heizöl/Erdgas in Verbindung mit einer zentralen Kesselanlage
- Fernwärme auf Basis von Kraft-Wärme-Kopplung
- Holzhackschnitzel in Verbindung mit einer zentralen Kesselanlage
- Erdgas in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplung

Bewertungskriterien	Erdgas Kessel	Fernwär. KWK	Hackschnitzel Kessel	Erdgas BHKW	Gewichtung
Machbarkeit	ja	ja	ja	ja	
Integration in Versorgungskonzept	ja	ja	ja	ja	
keine Rechtskonflikte	ja	ja	ja	ja	
verfügbare Ressource	ja	ja	ja	ja	
Anteil Versorgungsumfang	3	3	3	2	20%
Versorgungssicherheit	3	2	2	3	35%
Flexibilität gegenüber Strukturkonzepten	2	3	1	2	15%
Innovationsgrad (EEWärmeG)	1	2	2	3	30%
<b>Summe</b>	<b>2,25</b>	<b>2,35</b>	<b>2,05</b>	<b>2,65</b>	
<b>Rangfolge</b>	<b>3.</b>	<b>2.</b>	<b>4.</b>	<b>1.</b>	

Tabelle 8: Variantenvorauswahl

Die Variante mit Holzhackschnitzeleinsatz wurde anhand der durch die Nutzwertanalyse errechneten Rangfolge und unter Berücksichtigung der logistischen Probleme, der Genehmigungsfähigkeit und des erforderlichen Platzbedarfes aus der Betrachtung ausgeschlossen. Im Weiteren Verlauf der Arbeit werden ausschließlich die Kraftwärmekopplungsvarianten BHKW und Fernwärme sowie die Zentrale Kesselanlage untersucht.

### 5.3.2 Variantendefinition

Im Ergebnis der Variantenvorauswahl ergeben sich folgende Varianten, die einer detaillierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu unterziehen sind:

- Variante 1: Fernwärme - Dezentral (Referenz)
- Variante 2: Erdgas-BHKW
- Variante 3: Niedertemperaturkessel

Die Erzeugung von HDD-Dampf und der Ganzjahreskälte bleiben auf Grund ihrer Spezifikationen bei der Dimensionierung der Wärmeerzeugungsvarianten unberücksichtigt.

### 5.3.2.1 Variante 1 – Dezentrale Fernwärme

Die Variante 1 stellt die Versorgungsvariante dar, die nach dem bereits bestehenden Prinzip der Bestandsversorgung funktioniert und wird folglich für den weiteren Variantenvergleich als Referenzvariante mit der weitestgehend dezentralen Wärmeversorgung angesehen.

Es wird angenommen, dass für die zukünftige Erschließung des 2. BA mit Wärme zwei zusätzlich benötigte Fernwärmestationen, mit je einer installierten Leistung i.H.v. 1.500 kW, in den Versorgungsschwerpunkten errichtet werden müssen. Der Aufbau innerhalb der Fernwärmestationen erfolgt redundant, wobei jeder Wärmetauscher 70% der benötigten Wärmeleistung im Bedarfsfall bereitstellen kann. Die Versorgung der Stationen mit Fernwärme wird durch die Kopplung zwischen 1. und 2. BA in der Fernwärmestation im Gebäude 6116 realisiert. Alle anderen Fernwärmestationen des 1. BA bleiben innerhalb dieser Untersuchung unberücksichtigt. Ein Baukostenzuschuß für die Erhöhung der Fernwärmeleistung ist auf Grund der ausreichenden Leistungsreserven des bestehenden Fernwärmeanschluß i.H.v. 10 MW nicht nötig.

Die Leistungsdaten der Fernwärmestationen und deren Anteil an der Gesamtwärmeversorgung sowie die für die Dimensionierung der Anlagen zu Grunde gelegte Höchstwärmeleistung kann der Abbildung 43 entnommen werden.

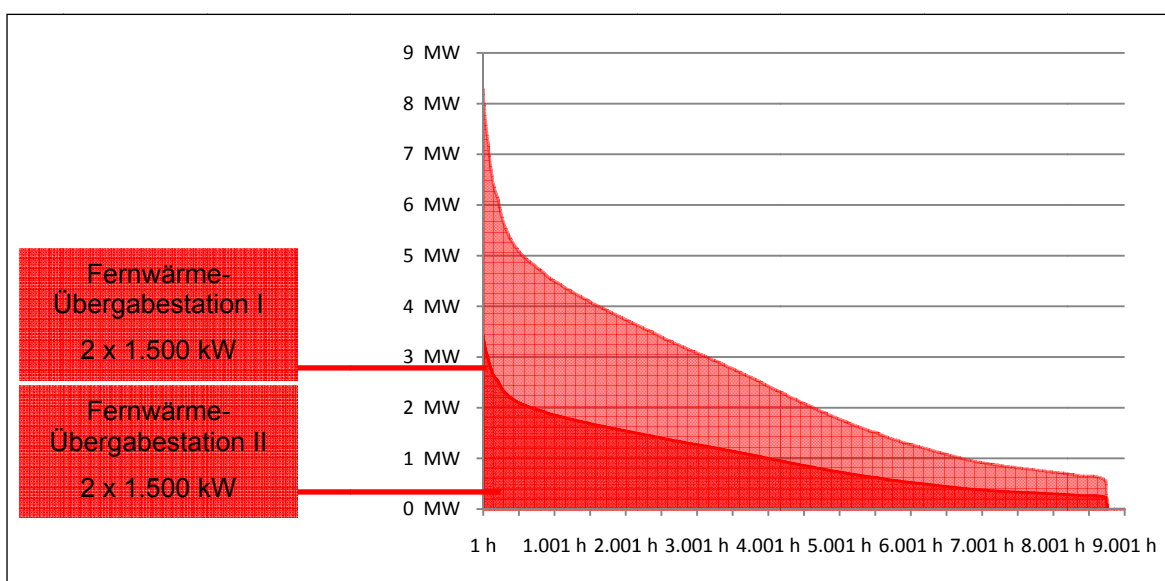


Abbildung 43: Schematische Darstellung Variante 1 mit Wärmebedarfsjahresmenge 1.- 2.BA

### 5.3.2.2 Variante 2 - Zentrale BHKW-Anlage

In der Variante 2 wird die Wärmeerzeugung wie in Variante 1 mittels Kraft-Wärme-Kopplung untersucht. Die Kraft-Wärme-Kopplung wird jedoch als BHKW-Anlage ausgeführt und soll den gesamten zukünftigen Wärmebedarf des Universitätsklinikums Jena am Standort Lobeda zentral bereitstellen.

Die angenommene zukünftige Erschließung des 1. und 2. BA mit Wärme erfolgt über ein eigenes zu errichtendes BHKW-Gebäude, angereicht am Gebäude 6116 NTZ. Durch diese Standortwahl lassen sich der Aufwand für die Einbindung des BHKW in das Wärme- und Mittelspannungsnetz sowie die nicht geringen Transportverluste auf ein Minimum reduzieren. Die Dimensionierung der darin zu installierenden Wärmeerzeugungsanlagen erfolgt anhand der Jahresdauerlinie und den entsprechend anvisierten Betriebsstunden. Es ist vorgesehen, dass durch ein BHKW der Wärmegrundlastbedarf des UKJ soweit wie möglich abgedeckt wird bzw. aus Sicherheitsgründen durch mehrere BHKW-Einzelmodule erzeugt wird. Das BHKW folgt bis zu seiner oberen Leistungsgrenze der Wärmebedarfskurve, die Niedertemperaturkessel decken den restlichen Wärmebedarf.

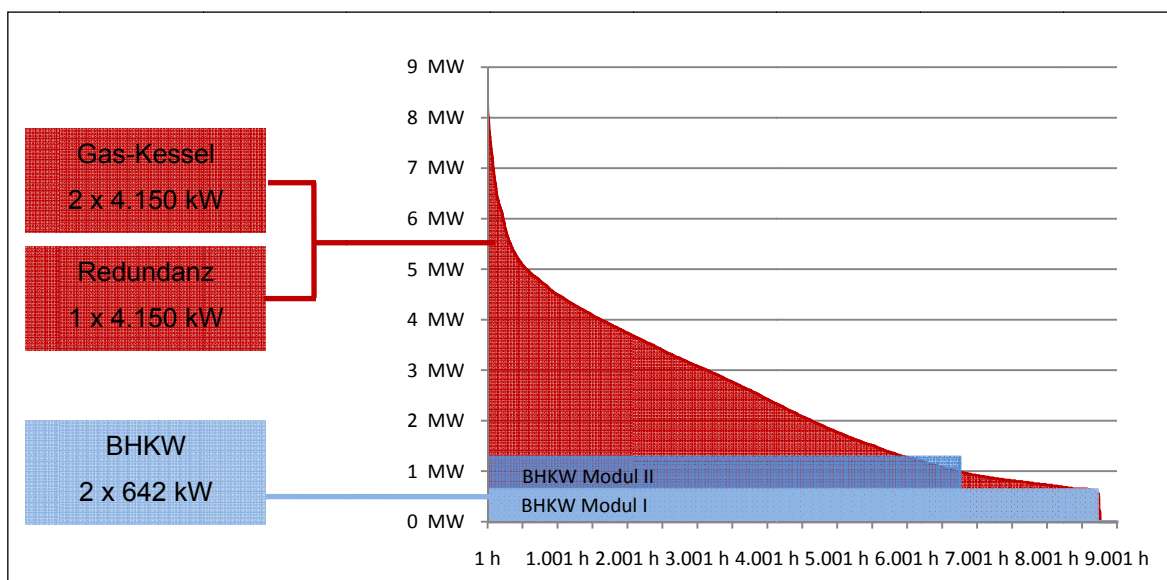


Abbildung 44: Schematische Darstellung Variante 2 mit Wärmebedarfsjahresmenge 1.- 2.BA

Für den berechneten Wärmebedarf wurde in Abhängigkeit der am Markt angebotenen Module ein BHKW der Firma Deutz AG (22), bestehend aus zwei Aggregaten mit einer jeweiligen Leistung von 508 kW<sub>el</sub> und 642 kW<sub>th</sub>, ausgewählt. Die

Entscheidung, dass zwei Module im UKJ zur Anwendung kommen, begründet sich allein durch den hohen Sicherheitsanspruch an die Strom- und Wärmeversorgung eines universitären Klinikums der Maximalversorgung. So ist mit dieser Variante gewährleistet, dass auch bei Ausfall der örtlichen Energieversorgung nicht nur auf die installierten Notstromaggregate sondern auch auf weitere Energieerzeugungsanlagen zurückgegriffen werden kann. Des Weiteren ergeben sich trotz des höheren Investitionsbedarfs Vorteile für die Anlagenverfügbarkeit bei Wartungen und Reparaturen sowie eine höhere Grundlastabdeckung durch die optimale Anpassung der Mehrmodultechnik an den Wärmebedarf erfolgen kann. Nach Feststellung der signifikanten Leistungsdaten des BHKW lassen sich aus den geordneten Jahresdauerlinien, Abbildungen 44 und 45, grafisch die dargestellten Vollbenutzungsstunden der Module für die Erzeugung für Wärme und Elektroenergie ermitteln. Für die Erzeugung von Elektroenergie ergibt sich für die 100%ige Eigenbedarfsdeckung ein Wert von etwa 8760 h, bei der Wärmeerzeugung sind je Modul 8720h und 6760h Vollbenutzungsstunden festzustellen. Da eine hohe Abdeckung des Wärmebedarfs Prämisse ist, wird die wärmegeführten Betriebsweise des BHKW, mit durchschnittlich 7740 Vollbenutzungsstunden, Grundlage für die im nächsten Abschnitt durchgeführte Wirtschaftlichkeitsberechnung sein.

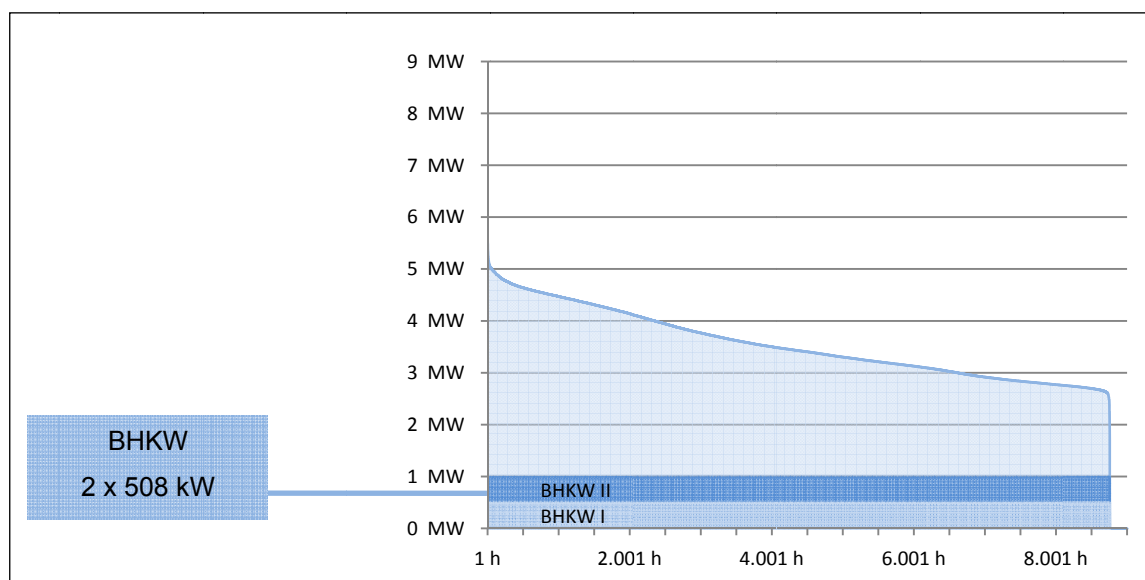


Abbildung 45: Schematische Darstellung Variante 2 mit Strombedarfsjahresmenge 1.- 2. BA



Die Leistungsdaten der einzelnen Erzeuger und deren Anteil an der Wärmeversorgung sowie die für die Dimensionierung der Anlagen zu Grunde gelegte Höchstwärmeleistung kann der Abbildung 44, 45 und der im Anhang 3 dargestellten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung entnommen werden.

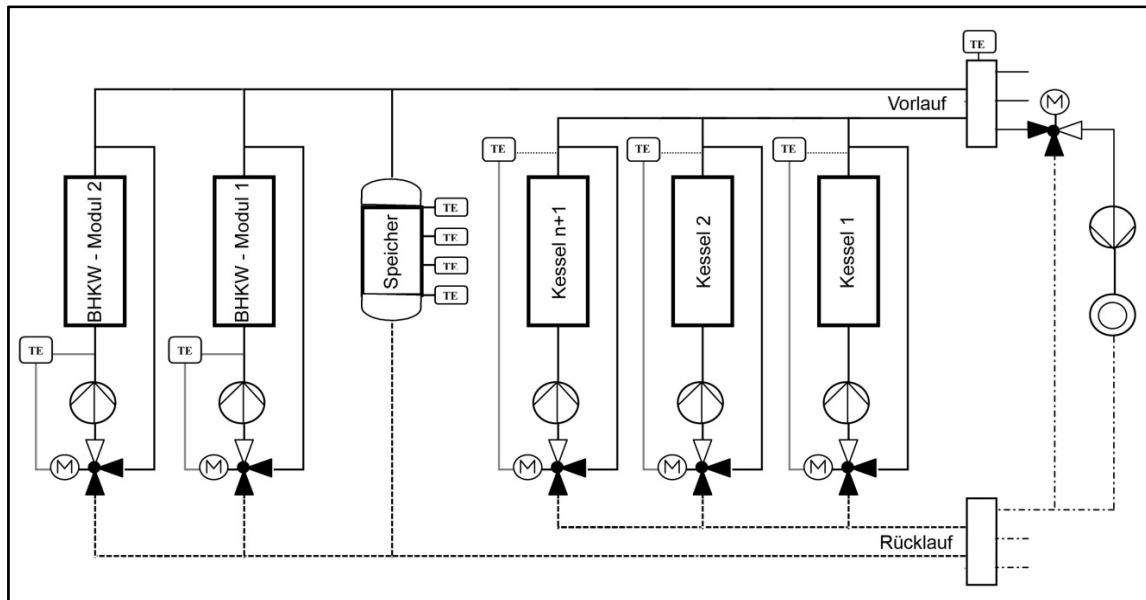


Abbildung 46: Hydraulische Einbindung BHKW 1. und 2. BA

Im Auslegungsbeispiel, Abbildung 46, wurde die Parallelschaltung ohne einen Notkühler vorgesehen. Es wird angenommen, dass bei dem erheblichen Gesamtwärmebedarfs des UKJ im Verhältnis zur Wärmeleistung des BHKW eine ausreichende Wärmeabnahme sichergestellt ist. Die Auslegung der Wärmetauscher orientiert sich an den üblichen Temperaturverhältnissen in Heizungsanlagen von 90°C im Vorlauf und 55°C im Rücklauf. Bei Rücklauftemperaturen kleiner 70°C vor den BHKW-Modulen erfolgt eine Rücklauftemperaturanhebung, indem über den Rücklauf-Mischer und einer Bypassleitung die Temperatur im Heizwasser-Rücklauf zu den Modulen erhöht wird. In Anbetracht der sehr langen Laufzeiten der einzelnen BHKW-Module und des beträchtlich ausgedehnten Wärmeversorgungsnetz, welches an sich bereits einen entsprechenden Wärmespeicher darstellt, ist zu überlegen inwieweit eine Minimierung des Pufferspeichervolumens erfolgen kann bzw. eventuell ganz darauf verzichtet werden kann.

### 5.3.2.3 Variante 3 - Zentrale Kesselanlage

In der Variante 3 wird eine eigene Kesselzentrale am Standort der Technikzentrale untersucht. Diese Standortwahl erfolgt ebenfalls wie bei Variante 2 auf Grund der zentralen Lage inmitten der Versorgungsschwerpunkte. Zur Wärmeenergieerzeugung wird eine zentrale gasbeheizte Kesselanlage mit drei SB825L Kesseln der Firma Buderus (21) vorgesehen.

Die Dimensionierung der Kesselanlage erfolgt auf die Höchstwärmeleistung des zu erwartenden Wärmebedarfs und muss zusätzlich, wie in Variante 2, für das schlimmste mögliche anzunehmende Szenario, den Ausfall eines Kessel bzw. Ausfall BHKW, mit einem Redundanz-Kessel ausgestattet werden. Im Hinblick auf die angestrebte Zentralisierung der Wärmeenergieerzeugung sind bauliche Notwendigkeiten unabdingbar. Ein eigenes zu errichtendes Kessel-Gebäude, angereicht am Gebäude 6116 NTZ, ist daher auch hier in dieser Variante mit berücksichtigt.

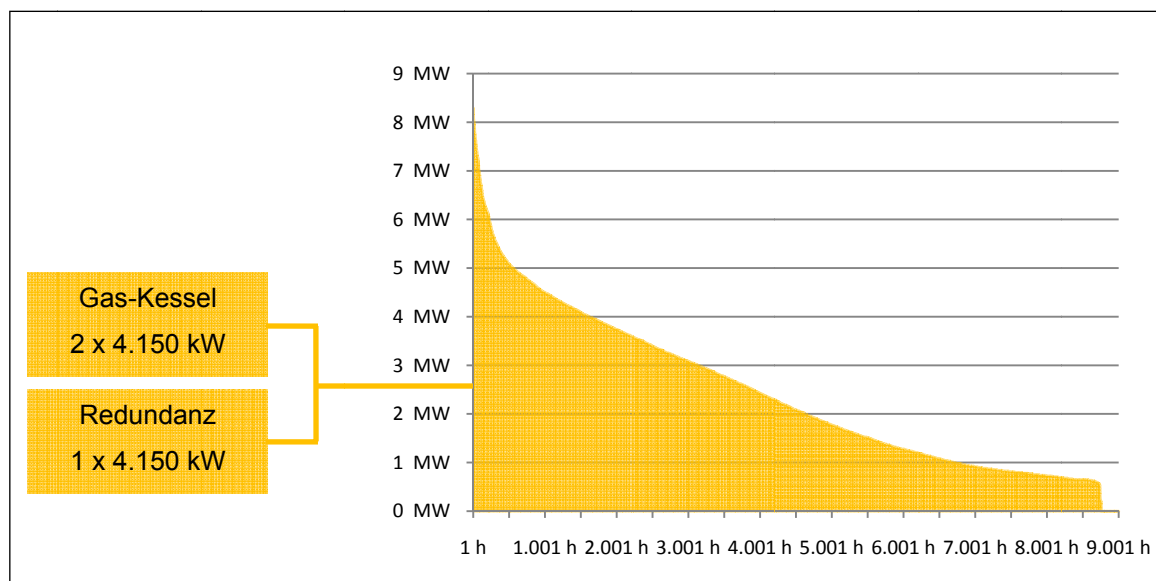


Abbildung 47: Schematische Darstellung Variante 3 mit Wärmebedarfsjahresmenge 1.- 2.BA

Die Leistungsdaten der Kesselanlage sowie die für die Dimensionierung der Anlagen zu Grunde gelegte Höchstwärmeleistung kann der Abbildung 47 entnommen werden.

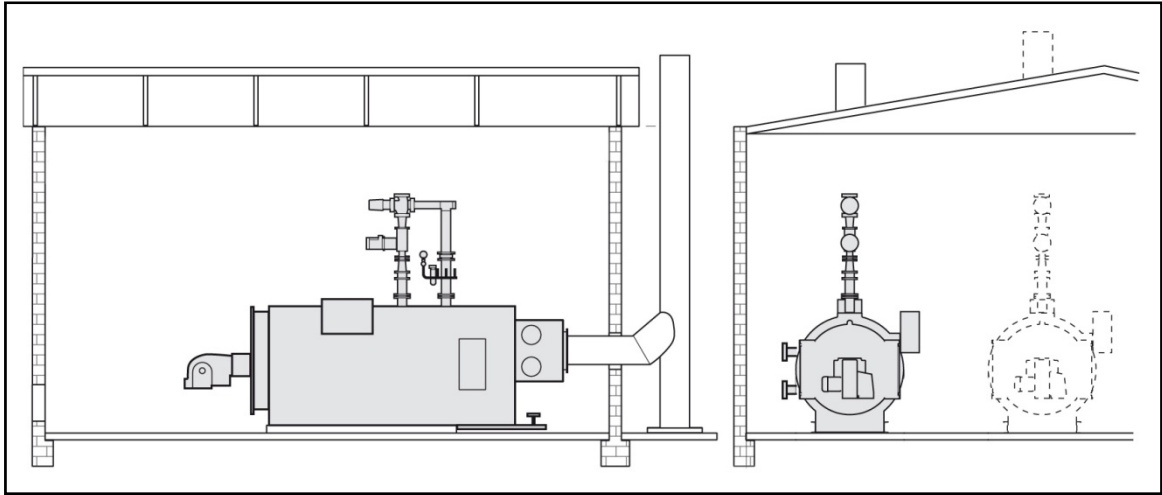


Abbildung 48: Beispielhafter Aufbau einer Heizungszentrale (21)

## **5.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse der Versorgungsvarianten**

Für die zu untersuchenden Varianten wurde eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt. Die Vorgehensweise erfolgt in Anlehnung der VDI-Richtlinie 2067 "Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen" unter Anwendung der Annuitätsmethode. Dabei werden die durchschnittlichen jährlichen Kosten einer Investition über ihre Nutzungsdauer sowie unter Berücksichtigung der künftigen Preissteigerung und Veränderung des Zeitwertes der Finanzmittel bestimmt.

### **5.4.1 Kapitalgebundene Kosten**

Für die Ermittlung der Kapitalkosten wurden zuerst die Investitionen für betriebstechnische Anlagenteile und deren Einbindung bestimmt. Dabei wurden die Kosten für die Kesselanlagen, BHKW-Anlagen, Fernwärmeübergabestationen, Erschließungskosten, Kosten für die Kaminanlagen und für die bauliche Hülle der Energiezentrale auf Basis von Kostenberechnungen aus vergleichbaren Objekten (22), dem Kennzifferkatalog der Energiewirtschaft (23) und den Erfahrungen des Dipl. Ing. Herrn Höhn sowie des Verfassers überschlägig zusammengestellt. In einem weiteren Schritt erfolgte, zur Ermittlung der jährlichen Kapitalkosten und zur Bestimmung des Annuitätsfaktors, die Unterteilung der Anlagenteile in die jeweiligen Kostenarten mit entsprechender Nutzungsdauer. Die Nutzungsdauer wurde in Anlehnung an Tabelle A2 der VDI-Richtlinie 2067 für Kesselanlagen mit 20 Jahren, für BHKW mit 15 Jahren und für Fernwärmeübergabestationen mit 30 Jahren bestimmt. Der Zinssatz der für die Investitionsrechnung zu Grunde gelegt wurde liegt etwas über den der für Anstalten der öffentlichen Hand marktüblich ist, bei 3%, spiegelt aber den zu erwartenden Zinssatz zum Realisierungszeitpunkt des Bauvorhabens wieder. Die durchschnittliche Inflation in Deutschland beträgt seit 2004 1,8% (24). Die daraus resultierende Annuität kann zum einen aus der Tabelle A8 der VDI-Richtlinie 2067 Blatt 1 entnommen werden oder mittels der Annuitätsfaktorformel berechnet werden. Sowohl die Annuitätsberechnungen als auch die detaillierte Aufstellung der Investitionskosten der einzelnen Varianten sind im Anhang 3 dargestellt.

<b>Darlehen (Stand 11.10.10)</b>	<b>Konditionen</b>
KfW - Kredit KfW - Programm Erneuerbare Energien - Programmteil "Premium" 5/ 1/ 5	- Zinssatz: 1,70 % (nominal) und 2,23 % (effektiv) für 10 Jahre - Laufzeit: 5 oder 10 Jahre bei 3 tilgungsfreien Anlaufjahren - Antragsberechtigt sind kommunale Vorhaben, Privatpersonen und gemeinnützige Organisationen, die die erzeugte Wärme ausschließlich für den Eigenbedarf nutzen - Kreditbetrag i.d.R. max. 10 Mio. Euro
KfW- Kommunalkredit KfW - Investitionsoffensive Infrastruktur (207) bis Jahresende 2010	- Zinssatz: 0,0 (effektiv) für 1 -2 Jahr 0,40 % (effektiv) für 3 -5 Jahr- Laufzeit: 5 Jahre - Antragsberechtigt sind kommunale Vorhaben, gemeinnützige Organisationen, Krankenhäuser - Kreditbetrag i.d.R. max. 2 Mio. Euro
KfW- Kommunalkredit KfW - Investitionsoffensive Infrastruktur (208)	- Zinssatz: 2,30 % (nominal) und 2,23 % (effektiv) für 10 Jahre - Laufzeit: 10, 20, 30 Jahre - Antragsberechtigt sind kommunale Vorhaben, gemeinnützige Organisationen, Krankenhäuser - Kreditbetrag i.d.R. max. 2 Mio. Euro
KfW - Kredit ERP-Umwelt-und Energieeffizienzprogramm - A (237, 247)	- Zinssatz: 1,65 % (nominal) und 1,66 % (effektiv) für 10 Jahre - Laufzeit: 5 oder 10 Jahre bei 3 tilgungsfreien Anlaufjahren - Antragsberechtigt sind kommunale Vorhaben, Privatpersonen und gemeinnützige Organisationen, die eine effiziente Energieerzeugung nutzen - Kreditbetrag bis 2 Mio.€: Finanzierungsanteil bis zu 100 % der förderfähigen Kosten - Kreditbeträge über 2 Mio. Euro: Finanzierungsanteil bis zu 50 % der förderfähigen Kosten

Tabelle 9: KfW-Förderprogramme (25)

	<b>Variante 1 Fernwärmeübergabestationen (Dezentral)</b>	<b>Variante 2 BHKW mit Kesselanlage (Zentral)</b>	<b>Variante 3 Kesselanlage (Zentral)</b>
<b>Investitionskosten</b>	<b>425.425 €</b>	<b>3.338.812 €</b>	<b>2.065.619 €</b>
<b>Kapitalkosten</b>	<b>21.705 €/a</b>	<b>215.690 €/a</b>	<b>128.575 €/a</b>
<b>Prozent</b>	<b>10%</b>	<b>100%</b>	<b>60%</b>

Tabelle 10: Zusammenstellung der Investitions- und Kapitalkosten der Varianten

Im Rahmen der Ermittlung der Amortisationsdauer wurden die investiven Kosten sowie die Kapitalaufwendungen der Referenzvariante 1 durch Subtraktion von den jeweiligen Kostengruppen der Variante 2 und 3 abgezogen, um so ausschließlich die Mehrinvestitionen in der Berechnung einfließen zu lassen (14).

#### 5.4.2 Verbrauchsgebundene Kosten

Als verbrauchsgebundene Kosten wurden bei den 3 Varianten die Beschaffungskosten für Fernwärme, Strom und Erdgas herangezogen. Zur Ermittlung dieser

wurden ausschließlich die aktuellen Lieferverträge der Energieversorgungsunternehmen berücksichtigt, mit ihren festen Grund- und Leistungspreisen, sowie den nach dem Gesamtvolumen richteten Arbeitspreisanteil pro verbrauchter Kilowattstunde. Die anzusetzenden Mengen wurden der Wärmeabrechnung des 1. BA entnommen und mit den durch Kennzahlen berechneten zusätzlichen Verbrauch des 2. BA verhältnismäßigen addiert. Aus dem daraus sich ergebenden Gesamtwärmebedarf des 1. und 2. BA wurde entsprechend den technischen Parametern, Wirkungs- und Nutzungsgrad, des jeweiligen Energieerzeugers der Brennstoffverbrauch ermittelt. In Anbetracht, dass während des Betrachtungszeitraumes von 15 Jahren sich Preisänderungen bei den laufenden Zahlungen für Energie- und Brennstoffe ergeben, wurden entsprechend der VDI 2067 diese Zahlungen mit dem preisdynamischen Annuitätsfaktor multipliziert. Der preisdynamische Annuitätsfaktor ergibt sich, indem die Annuität des Barwertfaktors ermittelt wird. Der berechnete Barwertfaktor beträgt 13,614. Weiterhin wurde für die Berechnungen ein Kalkulationszinssatz i.H.v. 3% angenommen und es wird erwartet, dass die Erdgas- Strom- und Fernwärmepreise langfristig einer jährlichen Teuerung von 4% unterworfen sein werden, während die übrigen Betriebskosten der allgemeinen Teuerung von durchschnittlich 2% folgen.

Nachstehende Energiebezugspreise des Jahres 2010, mit den darin enthaltenen Anteilen für Mehrwert- und Stromsteuer, Bereitstellung, Konzessionsabgaben, Steuer aus dem Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) und der Steuer aus dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, sind Grundlage der Berechnungen:

• Erdgas Arbeitspreis (Stadtwerke Chemnitz)	42,59 €/MWh
Erdgas Leistungspreis	17,04 €/kW
Mess- und Verrechnungskosten:	1.835,37 €/a
• Fernwärme Arbeitspreis (Stadtwerke Jena):	68,62 €/MWh
Fernwärme Leistungspreis	25,93 €/kW
Mess- und Verrechnungskosten:	756,84 €/a
• Stromarbeitsmischpreis: (Stadtwerke Chemnitz)	131,47 €/MWh
Leistungspreis	55,25 €/kW
Mess- und Verrechnungskosten:	2074,61 €/a

	Variante 1 Fernwärmeübergabestationen (Dezentral)	Variante 2 BHKW mit Kesselanlage (Zentral)	Variante 3 Kesselanlage (Zentral)
Verbrauchskosten	7.852.324 €	6.718.330 €	7.276.783 €
Prozent	100%	86%	93%

Tabelle 11: Zusammenstellung der Verbrauchskosten der Varianten

Die detaillierte Aufstellung der Verbrauchskosten der einzelnen Varianten sind dem Anhang 3 zu entnehmen.

### 5.4.3 Gutschriften Erlöse

Die Erlöse aus Gutschriften setzen sich aus den Steuervergünstigungen zusammen die im Rahmen der novellierten Gesetzgebung des Energiesteuergesetz und des Stromsteuergesetz im Jahr 2009 durch das Ministerium der Finanzen festgelegt wurden (26). So ist festzustellen, dass nur die Variante 2 die Voraussetzungen zur steuerlichen Begünstigung erfüllt. Im Einzelnen ergibt sich für den Anwendungsfall der hocheffizienten Kraft-Wärme-Kopplungsanlage im UKJ eine Befreiung von der Energiesteuer von insgesamt 0,55 Ct/kWh (ehemals Mineralölsteuer von 0,184 Ct/kWh plus Öko-Mineralölsteuer von 0,366 Ct/kWh) und eine Befreiung von der Stromsteuer von insgesamt 2,05 Ct/kWh für die erzeugte und zeitgleich verbrauchte Elektroenergie. Weitere finanzielle Erlöse gehen durch die anteilige Netznutzungsreduzierung positiv in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein. Im Gegensatz zur Energiesteuerrückerstattung wird für den Betrachtungszeitraum von 15 Jahren davon ausgegangen, dass die anteilige Netznutzungsreduzierung Preisänderungen unterlegen ist. Es erfolgt daher bei der Feststellung der Gutschriften der Variante 2 eine preisdynamische Anpassung durch den Annuitätsfaktor.

Spannungsebene	Vergütung
Hochspannung	0,04 kWh/Ct
Umspannung zur Mittelspannung	0,02 kWh/Ct
Mittelspannung	0,18 kWh/Ct
Umspannung zur Niederspannung	0,45 kWh/Ct
Niederspannung	0,45 kWh/Ct

Tabelle 12: Übersicht für Zusatzvergütung aus vermiedener Netznutzung

Eine Übersicht der möglichen Befreiungen und Vergütungen zeigen die Tabellen 12, 13 und 14. Da der vom BHKW erzeugte Elektroenergie komplett eigengenutzt wird, ist das KWK-Gesetz in diesem Falle ohne Relevanz, soll aber an dieser Stelle dennoch genannt werden, da sich dadurch eventuell zukünftige weitere Kostenvorteile ergeben können.

Steuerliche Rückerstattung	Energieform	Erstattung
<b>Energiesteuer</b>	Erdgas	0,550 Ct/kWh
	Flüssiggas	6,060 Ct/kg
	leichtes Heizöl	6,135 Ct/Liter
	sonstige Heizöle	2,500 Ct/kg
<b>Stromsteuer</b>	Elektroenergie	2,050 Ct/kWh

Tabelle 13: Übersicht Steuerbefreiung für hocheffiziente KWK-Anlagen (26)

Elektrische Leistung von KWK-Anlagen	Zuschlag	Maximale Förderzeitraum	
<b>bis 50 kWel</b>	5,11 kWh/ct	10 Jahre	-
<b>über 50 kWel bis 2 MWel</b>			
-für den Leistungsanteil bis 50 kWel	5,11 kWh/ct	6 Jahre	30000 VBNS
-für den Leistungsanteil über 50 kWel	2,10 kWh/ct	6 Jahre	30000 VBNS
<b>über 2 MWel</b>			
-für den Leistungsanteil bis 50 kWel	5,11 kWh/ct	6 Jahre	30000 VBNS
-für den Leistungsanteil über 50 kWel bis 2 MWel	2,10 kWh/ct	6 Jahre	30000 VBNS
-für den Leistungsanteil über 2 MWel	1,50 kWh/ct	6 Jahre	30000 VBNS
-Industrie (produzierendes Gewerbe)	1,50 kWh/ct	4 Jahre	30000 VBNS

Tabelle 14: Vergütungsübersicht gemäß Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (27)

	Variante 1 Fernwärmestationen (Dezentral)	Variante 2 BHKW mit Kesselanlage (Zentral)	Variante 3 Kesselanlage (Zentral)
<b>Gutschriften</b>	<b>0 €</b>	<b>152.244 €</b>	<b>0 €</b>
<b>Prozent</b>	<b>0%</b>	<b>100%</b>	<b>0%</b>

Tabelle 15: Zusammenstellung der Gutschriften der Varianten

Die detaillierte Aufstellung der Gutschriften der einzelnen Varianten sind im Anhang 3 dargestellt



#### 5.4.4 Betriebsgebundenen Kosten

Zur Feststellung der betriebsgebundenen Kosten wurden im Wesentlichen die Instandhaltungs-, die Wartungs- und die Bedienungsaufwendungen gemäß der VDI-Richtlinie 2067 Blatt 1 herangezogen. Dabei wurden für die Instandsetzung und Wartung von Kesselanlagen über 120kW in Summe 2,5% des Investitionsbetrags pro Jahr angesetzt. Für die BHKW-Module wurde ein Instandhaltungsvertrag (Vollwartungsvertrag) angenommen. Dieser beinhaltet alle Wartungs-, Reparaturarbeiten, Ersatzteile, Betriebsstoffe (exklusive Brennstoff), die für das BHKW benötigt werden. Die angesetzten Kosten für den Vollwartungsvertrag sowie die nach 60.000 Betriebsstunden notwendige Generalüberholungsaufwendungen basieren auf den Ausgleichsfunktionen, die in der Literatur der ASUE „BHKW-Kenndaten 2005“ (22) veröffentlicht sind.

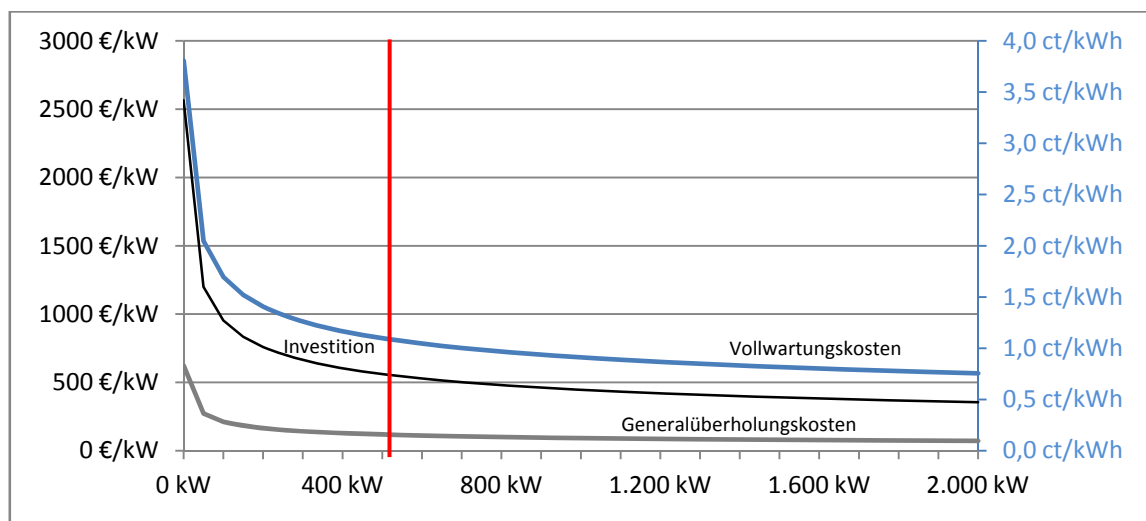


Abbildung 49: Kosten für Instandhaltungsvertrag und Generalüberholung von BHKW (22)

Der kalkulatorische Vorteil bei einem Vollwartungsvertrag besteht darin, dass die maximalen Aufwendungen in den Wirtschaftlichkeitsnachweis einfließen und somit für den Betreiber eine relative Kostensicherheit bei der Betriebsführung erzielt werden kann. In der Regel wird nach Ablauf der Gewährleistung, zur Steigerung des finanziellen Erlöses, der Vollwartungsvertrag in den kostengünstigeren Teilwartungsvertrag umgewandelt. Im Weiteren wurden mit dem Ziel die Vergleichbarkeit der Varianten untereinander zu wahren die betriebsgebundenen Kosten, nach überschlägiger Investitionskostenfeststellung für alle Neu- und Bestand-sfernwärmeübergabestationen und der dazugehörigen Trassen, ermittelt. Die

betriebsgebundenen Fernwärmekosten für Wartung und Instandsetzung belaufen sich auf 3% des Investitionsbetrags. Die Aufwendungen für Bedienung betragen nach VDI 2067 Blatt 1 für jede Kesselanlage 20 Stunden pro Jahr, für BHKW 100 Stunden pro Jahr und für die Fernwärmestationen 0 h. Wie bereits bei den anderen Kostengruppen erfolgt, findet abschließend die künftigen Preissteigerungen und Veränderung des Zeitwertes der Finanzmittel über den dynamischen Annuitätsfaktor Berücksichtigung. Für die Berechnungen wurde ein Kalkulationszinssatz i.H.v. 3% angenommen und es wird erwartet, dass die Betriebskosten der allgemeinen Teuerung von durchschnittlich 2% folgen

	<b>Variante 1</b> <b>Fernwärmeübergabestationen</b> <b>(Dezentral)</b>	<b>Variante 2</b> <b>BHKW mit Kesselanlage</b> <b>(Zentral)</b>	<b>Variante 3</b> <b>Kesselanlage</b> <b>(Zentral)</b>
<b>Betriebskosten</b>	<b>20.869 €</b>	<b>186.560 €</b>	<b>43.871 €</b>
<b>Prozent</b>	<b>11%</b>	<b>100%</b>	<b>24%</b>

Tabelle 16: Zusammenstellung der Betriebskosten der Varianten

Die Herleitung der betriebsgebundenen Kosten der einzelnen Varianten können dem Anhang 3 vollständig entnommen werden.

#### 5.4.5 Emissionen

Bei einem vollständigen Vergleich der drei Varianten ist nicht nur der wirtschaftliche Aspekt relevant sondern nach heutiger Sicht auch der ökologische. Hierfür wurden die Fernwärme, die Niedertemperaturkessel und das BHKW anhand des Primärenergieaufwandes auf den daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Ausstosses bewertet. Maßgebend für die Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emissionswerte sind die Emissionsfaktoren, die sich aus der Masse eines freigesetzten Stoffes zu der eingesetzten Masse eines Ausgangsstoffes berechnen (28). Für den im deutschlandweiten Kraftwerksmix erzeugte Strom wurde der Emissionsfaktor aus den Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen von 575 kg/MWh (29) herangezogen. Weiterhin wurden für die im Anhang 3 aufgezeigte detaillierten Berechnungen die Emissionswerte für den Brennstoff Erdgas 205 kg/MWh und für Fernwärme 303 kg/MWh (30) herangezogen.

	Variante 1 Fernwärmestationen (Dezentral)	Variante 2 BHKW mit Kesselanlage (Zentral)	Variante 3 Kesselanlage (Zentral)
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>	<b>23.793 t/a</b>	<b>20.750 t/a</b>	<b>22.378 t/a</b>
<b>Prozent</b>	<b>100%</b>	<b>87%</b>	<b>94%</b>

Tabelle 17: Zusammenstellung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Varianten

### 5.4.6 Sensitivitätsanalyse

Die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Varianten ist stark von dem Verhältnis der Primärenergiepreise auf dem Markt abhängig. Vor diesem Hintergrund wurde eine Sensitivitätsanalyse der Varianten anhand der Zielgröße der Wärmegestehungskosten durchgeführt. Zur Bestimmung der Wärmegestehungskosten wurden die Gesamtjahreskosten in das Verhältnis zur erzeugten Nutzwärme gesetzt.

	Variante 1 Fernwärmestationen (Dezentral)	Variante 2 BHKW mit Kesselanl. (Zentral)	Variante 3 Kesselanlage (Zentral)
<b>Wärmegestehungskosten</b>	<b>434 €/MWh</b>	<b>383 €/MWh</b>	<b>409 €/MWh</b>
<b>Prozent</b>	<b>100%</b>	<b>88%</b>	<b>94%</b>

Tabelle 18: Zusammenstellung der Wärmegestehungskosten der Varianten

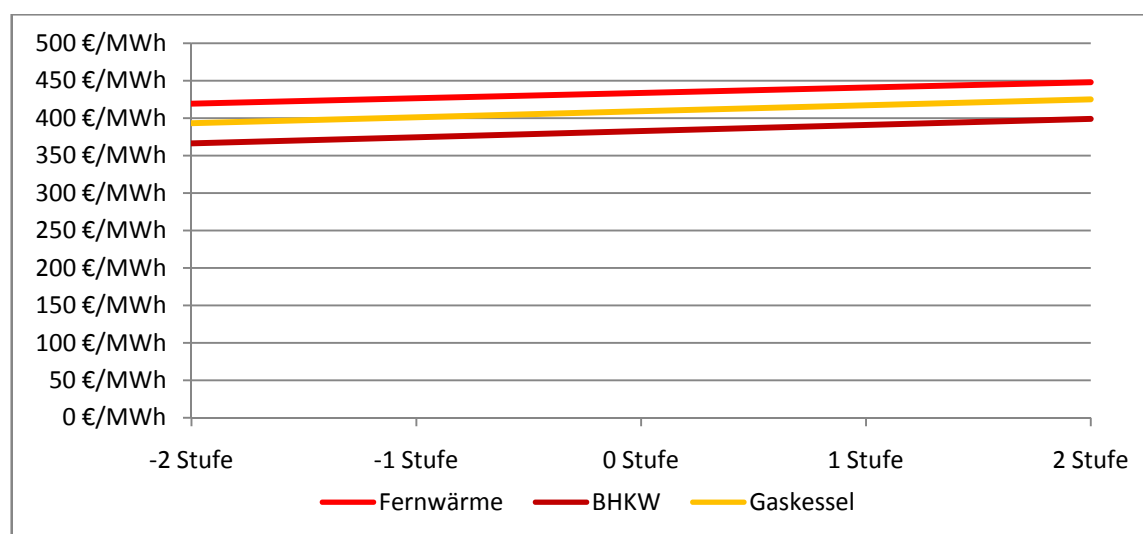


Abbildung 50: Sensitivitätsanalyse der Wärmegestehungskosten

Folgende Preissteigerungsraten waren Grundlage der Sensitivitätsanalyse des Wärmegestehungspreises der zu beleuchtenden 3 Varianten.

- Erdgas: 10 % / Stufe
- Fernwärme: 5 % / Stufe
- Elektroenergie: 5 % / Stufe

## 5.5 Zusammenfassung

Die energiewirtschaftliche Analyse am UKJ zeigt, dass durch die ausgewählte BHKW-Kesselanlagen-Kombination die geringsten Jahreskosten verursacht werden. Es ergibt sich eine beachtliche Jahreskostensparnis von 926.562 €, die eine Amortisationszeit der Anlagen von 3,09 Jahren nach sich zieht. Grundlagen für das sehr gute Ergebnis waren vor allem die hohen jährlichen Benutzungsstunden der BHKW-Module und der weitgehend gleichzeitige Bedarf an Strom und Wärme. Verglichen mit der Referenzvariante Fernwärme und der Kesselanlage ohne BHKW ist nach 15 Jahren, exklusiv der Beanspruchung der EEG- und KWK-Förderung, ein kumulierter Gewinn i.H.v. 13.898.433 € zu verzeichnen. In Anbetracht des Ergebnisses der Sensitivitätsanalyse kann die Wirtschaftlichkeit als relativ stabil bezeichnet werden.

Kosten	Variante 1 Fernwärme (Dezentral)	Variante 2 BHKW mit Kesselanl. (Zentral)	Variante 3 Kesselanlage (Zentral)
<b>Investitionskosten</b>	425.425 €	3.338.812 €	2.065.619 €
Mehrinvestition	0 €	2.913.387 €	1.640.194 €
<b>Jahreskostenvergleich</b>			
Kapitalkosten	21.705 €/a	215.690 €/a	128.575 €/a
Betriebskosten	20.869 €/a	186.560 €/a	43.871 €/a
Brennstoff/Fernwärmekosten	1.987.449 €/a	2.243.784 €/a	1.411.907 €/a
Stromkosten	5.864.876 €/a	4.474.546 €/a	5.864.876 €/a
Gutschriften	0 €/a	-152.244 €/a	0 €/a
<b>Jahreskosten</b>	<b>7.894.898 €/a</b>	<b>6.968.336 €/a</b>	<b>7.449.229 €/a</b>
prozentual	100%	88%	94%
<b>WärmeGESTEHUNGSKOSTEN</b>	<b>434 €/MWh</b>	<b>383 €/MWh</b>	<b>409 €/MWh</b>
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>	<b>23.793 t/a</b>	<b>20.750 t/a</b>	<b>22.378 t/a</b>
<b>Jahresdifferenz (Gewinn)</b>		<b>926.562 €/a</b>	<b>445.669 €/a</b>
Kum. Gewinn in 15 Jahren		13.898.433 €	6.685.041 €
<b>Amortisationsdauer</b>		<b>3,09 Jahre</b>	<b>3,77 Jahre</b>

Tabelle 19: Übersicht zur Wirtschaftlichkeitsberechnung der Varianten

Anhand der in Tabelle 19 dargestellten Kostengruppen ist klar ersichtlich, dass auch bei erheblichem Mehrinvestitionsbedarf für BHKW-Anlagen der Einsatz dieser, bei entsprechenden Rahmenbedingungen, als wirtschaftlich sinnvoll erscheint. So führten die Barrieren der wärmetechnischen Erschließung des 1.BA und der sehr kostenintensive Heizzentralenneubau nicht zur Unwirtschaftlichkeit. In Bezug auf die nicht unbedingt erwartete Wirtschaftlichkeit der getrennten Energieerzeugung von Strom und Wärme, bei einem finanziellem Vorteil nach 3,77 Jahren ist anzumerken, dass diese in unmittelbarer Abhängigkeit der recht hohen Preiskonditionen des Fernwärmelieferanten stehen. Bei gleich bleibendem hohem Preisniveau für Fernwärme ist daher zukünftig kritisch zu überprüfen, in welchem Maße eine konventionelle Wärmeherzeugung zur Versorgung einer Liegenschaft ökonomische Vorteile bringt.

Im Rahmen einer ganzheitlichen Bewertung der 3 Varianten fanden nicht nur die ökonomischen Kriterien sondern auch die ökologischen Kriterien Berücksichtigung. Dabei zeigt sich im Variantenvergleich, dass bei der Anwendung des Prinzips der Kraft-Wärme-Kopplung erheblich Einsparungen von Primärenergie und des Kohlendioxidemissionen erzielt werden können. Im Speziellen wird mit der Variante 2 der größte Beitrag zum Umweltschutz geleistet. Die Einsparungen bei dem jährlichen Primärenergieeinsatz betragen ca. 13% und die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen verringern sich um 3.044 t auf 20.750 t.

## 6 Resümee und Ausblick

Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist, dass die Integration von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen zur gekoppelten Erzeugung und Nutzung von Strom und Wärme einen erheblichen Beitrag zum finanziellen Erfolg des Universitätsklinikum Jena leisten können. Die wirtschaftlichen Vorteile ergeben sich vorwiegend aus der Verringerung des Strombezuges, weil hier der Verbrauch von eigenem Strom mit den Bezugstarifen bewertet wurde und folglich die Einsparungen aus dem BHKW-Betrieb generiert werden. Neben dem Strombezugspreis wurden für die ökonomische Vorteilhaftigkeit der Brennstoffpreise, Investitionsförderungen der KfW, die Vergütung des eingespeisten Stromes und mögliche steuerliche Vergünstigungen als wesentliche Parameter identifiziert. Bei der im Kapitel 5 beschriebenen BHKW-Anlage würde sich die Investition bereits nach rund 3 Jahren amortisieren und die Energiekosten nachhaltig senken. Des Weiteren ergeben sich mit der Anwendung des Prinzips der dezentralen gekoppelten Energieerzeugung durch die signifikante Einsparungen von Primärenergie, einen verminderten Schadstoffausstoß und reduzierte Kohlendioxidemissionen ein wichtiger Beitrag zum Umweltschutz. Im konkreten Fall wird mit der ausgewählten BHKW-Anlage eine jährliche CO<sub>2</sub>-Reduzierung von rund 3.044 t gegenüber zur konventionellen Strom- und Wärmeerzeugung erzielt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Wirtschaftlichkeit in Bezug auf ein wärmegeführtes BHKW analysiert. Der konstant hohe Strombezug lässt vermuten, dass ein stromgeführtes BHKW in gleicher Weise finanzielle Vorteile für das UKJ erwirtschaften kann. Daher ist eine Untersuchung anzustreben, die aufbauend auf den prognostizierten Energiebedarfswerte des 1. und 2. BA, unter Berücksichtigung einer sinnvollen Verwendung der überschüssigen Wärmemengen, den Einsatz eines stromgeführten BHKW prüft.

## Anhang 1 - VDI 3985 Arbeitsablaufdiagramm

– 12 –

VDI 3985

All rights reserved © Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 2003

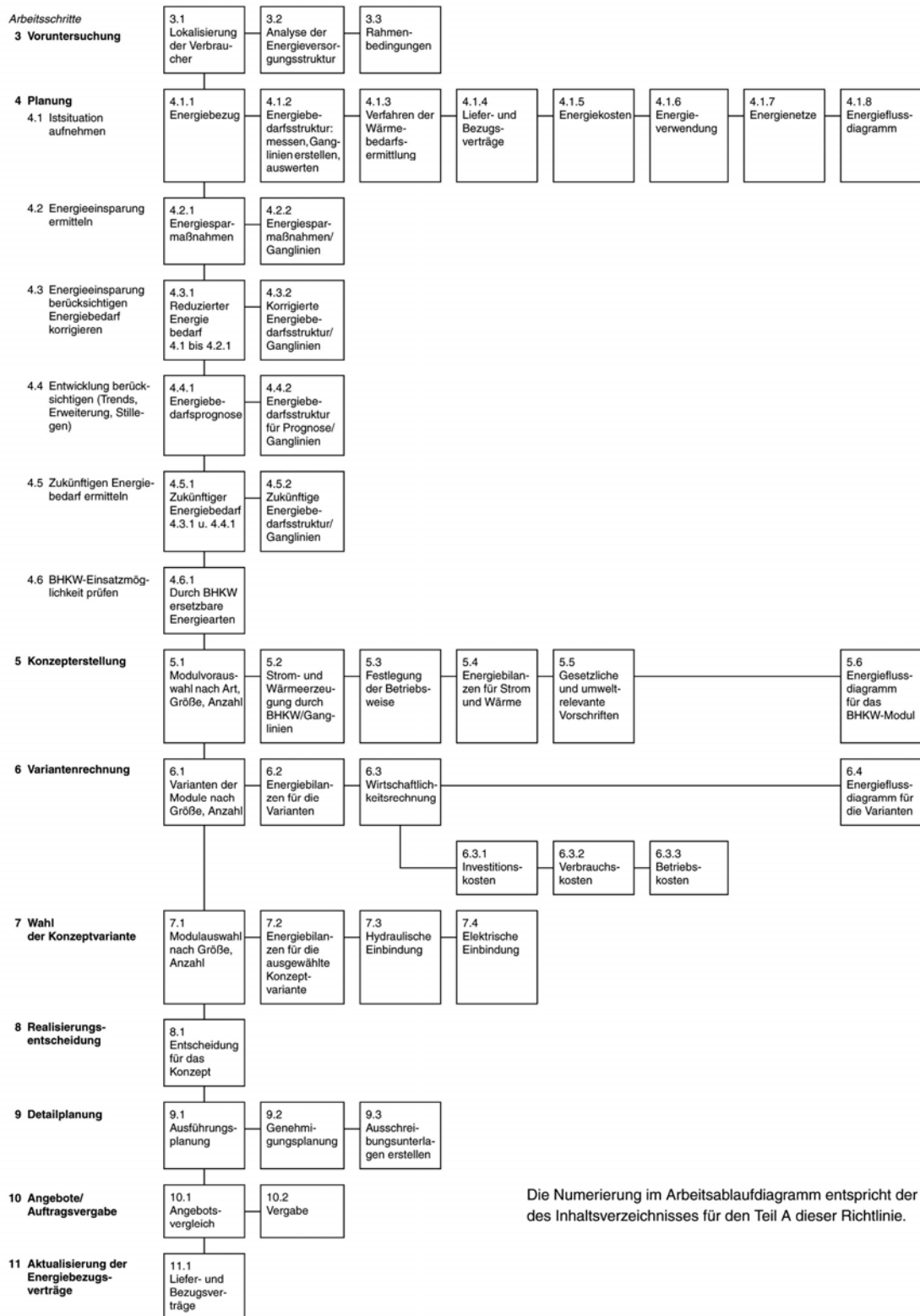


Bild 2. Arbeitsablaufdiagramm – Arbeitsschritte zur Voruntersuchung, Planung von BHKW und Auftragsvergabe



## Anhang 2 - Zusammenstellung der Wärme Bedarfs- und Verbrauchswerte

alle Flächen NGF	Bedarf				
	Basiswerte		Wärme		
Objekte	m²	Betten	Kennwert je m²	Anschlußleistung kW	Bedarf MWh/a
6120 Systemfertigbau	3839		115 kW	410 MWh/a	440 MWh/a
6130 ehem. Dialyse	565		115 kW	70 MWh/a	65 MWh/a
6160 NTZ	445	360	207 kWh/m²	2.626 kW	4.641 MWh/a
6113 KIM Bettenhaus	12.151 m²				
6114 Komplement	7.378 m²				
6115 KIM Laborgebäude	2.455 m²				
6211 UB-Süd 1	8.346 m²		113 kWh/m²	1.745 kW	2.718 MWh/a
6212 UB-Süd 2	8.194 m²				
6213 UB-Süd 3	5.421 m²				
6214 UB-Süd 4	2.054 m²				
6216 Bettenhaus 3	6.011 m²		141 kWh/m²	480 kW	848 MWh/a
6217 Bettenhaus 2	5.997 m²		128 kWh/m²	845 kW	1.272 MWh/a
6215 UB-Nord 2	3.908 m²				
6218 Magistrale	8.136 m²				
6241 Eingangsgebäude	1.103 m²				
6220 Dienstleistungsz.	6.320 m²		184 kWh/m²	740 kW	1.161 MWh/a
6230 Forschungsgeb.	8.031 m²		166 kWh/m²	1.160 kW	1.337 MWh/a
6242 UB Nord 1	4.741 m²		101 kWh/m²	1.300 kW	1.148 MWh/a
6243 Bettenhaus 1	6.593 m²				
6244 Laborgebäude	6.593 m²		173 kWh/m²	818 kW	1.138 MWh/a
6219 Palliativgebäude	1.440 m²	12	132 kWh/m²	80 kW	190 MWh/a
<b>1.BA gesamt installiert</b>	<b>109.721 m²</b>	<b>816</b>	<b>136 kWh/m²</b>	<b>10.274 kW</b>	<b>14.958 MWh/a</b>
<b>Witterungsberein. 0,95 ohne Geb. 6113 - 6115</b>	<b>87.292 m²</b>	<b>456</b>	<b>121 kWh/m²</b>	<b>7.648 kW</b>	<b>10.588 MWh/a 2.500 h/a</b>
<b>2. BA</b>	<b>74.000 m²</b>	<b>731</b>	<b>121 kWh/m²</b>	<b>3.049 kW</b>	<b>7.622 MWh/a</b>
<b>davon Kühlen</b>	<b>25.400 m²</b>		<b>(103 kWh/m²)</b>		
<b>UKJ gesamt Bedarf GZF=1,0 Wärme, Strom, GZF=0,9 HDD, Kälte</b>	<b>161.292 m²</b>	<b>1.187</b>	<b>121 kWh/m²</b>	<b>7.284 kW</b>	<b>18.210 MWh/a</b>

## Anhang 2 - Zusammenstellung der Heißdampf Bedarfs- und Verbrauchswerte

alle Flächen NGF	Bedarf					
	Basiswerte		Heißdruckdampf			
Objekte	m²	Betten	Kennwert je Bett	Anschl.-leistung kW	Anschl. Bedarf MWh/a	VBS h/a
6120 Systemfertigbau	3839					
6130 ehem. Dialyse	565					
6160 NTZ	445					
6113 KIM Bettenhaus	12.151 m²					
6114 Komplement	7.378 m²					
6115 KIM Laborgebäude	2.455 m²	360				
6211 UB-Süd 1	8.346 m²					
6212 UB-Süd 2	8.194 m²					
6213 UB-Süd 3	5.421 m²					
6214 UB-Süd 4	2.054 m²					
6216 Bettenhaus 3	6.011 m²					
6217 Bettenhaus 2	5.997 m²					
6215 UB-Nord 2	3.908 m²					
6218 Magistrale	8.136 m²					
6241 Eingangsgebäude	1.103 m²					
6220 Dienstleistungsz.	6.320 m²					
6230 Forschungsgeb.	8.031 m²					
6242 UB Nord 1	4.741 m²					
6243 Bettenhaus 1	6.593 m²					
6244 Laborgebäude	6.593 m²					
6219 Palliativgebäude	1.440 m²	12				
<b>1.BA gesamt installiert</b>	<b>109.721 m²</b>	<b>816</b>	<b>1,66 kW 4,82 MWh</b>	<b>1.355 kW</b>	<b>3.935 MWh/a</b>	<b>2.904 h/a</b>
<b>Witterungsberein. 0,95 ohne 6113 - 6115</b>	<b>87.292 m²</b>	<b>456</b>				
<b>2. BA davon Kühlen</b>	<b>74.000 m² 25.400 m²</b>	<b>731</b>	<b>1,66 kW 4,82 MWh</b>	<b>1.213 kW</b>	<b>3.523 MWh</b>	<b>2.904 h/a</b>
<b>UKJ gesamt Bedarf GZF=1,0 Wärme, Strom, GZF=0,9 HDD, Kälte</b>	<b>161.292 m²</b>	<b>1.187</b>	<b>1,66 kW 4,82 MWh</b>	<b>1.773 kW</b>	<b>5.149 MWh/a</b>	<b>2.904 h/a</b>

## Anhang 2 - Zusammenstellung der Strom Bedarfs- und Verbrauchswerte

alle Flächen NGF	Bedarf				
	Basiswerte		Strom		
Objekte	m <sup>2</sup>	Betten	Kennwert je m <sup>2</sup>	Anschlußleistung kW	Bedarf MWh/a
6120 Systemfertigbau	3839		15 kW	500 kW	57 MWh/a
6130 ehem. Dialyse	565		11 kW	150 kW	6 MWh/a
6160 NTZ	445	360	153 kWh/m <sup>2</sup>	1.700 kW	3.442 MWh/a
6113 KIM Bettenhaus	12.151 m <sup>2</sup>				
6114 Komplement	7.378 m <sup>2</sup>				
6115 KIM Laborgebäude	2.455 m <sup>2</sup>				
6211 UB-Süd 1	8.346 m <sup>2</sup>		277 kWh/m <sup>2</sup>	1.300 kW	2.308 MWh/a
6212 UB-Süd 2	8.194 m <sup>2</sup>		157 kWh/m <sup>2</sup>		1.282 MWh/a
6213 UB-Süd 3	5.421 m <sup>2</sup>		243 kWh/m <sup>2</sup>		1.316 MWh/a
6214 UB-Süd 4	2.054 m <sup>2</sup>		197 kWh/m <sup>2</sup>		405 MWh/a
6216 Bettenhaus 3	6.011 m <sup>2</sup>		303 kWh/m <sup>2</sup>	450 kW	1.823 MWh/a
6217 Bettenhaus 2	5.997 m <sup>2</sup>		142 kWh/m <sup>2</sup>	430 kW	850 MWh/a
6215 UB-Nord 2	3.908 m <sup>2</sup>		243 kWh/m <sup>2</sup>	360 kW	950 MWh/a
6218 Magistrale	8.136 m <sup>2</sup>		13 kWh/m <sup>2</sup>		121 MWh/a
6241 Eingangsgebäude	1.103 m <sup>2</sup>				
6220 Dienstleistungsz.	6.320 m <sup>2</sup>		411 kWh/m <sup>2</sup>	1.100 kW	2.598 MWh/a
6230 Forschungsgeb.	8.031 m <sup>2</sup>		352 kWh/m <sup>2</sup>	1.500 kW	2.825 MWh/a
6242 UB Nord 1	4.741 m <sup>2</sup>		86 kWh/m <sup>2</sup>	490 kW	976 MWh/a
6243 Bettenhaus 1	6.593 m <sup>2</sup>				
6244 Laborgebäude	6.593 m <sup>2</sup>		306 kWh/m <sup>2</sup>	1.100 kW	2.014 MWh/a
6219 Palliativgebäude	1.440 m <sup>2</sup>	12	133 kWh/m <sup>2</sup>	200 kW	191 MWh/a
<b>1.BA gesamt installiert</b>	<b>109.721 m<sup>2</sup></b>	<b>816</b>	<b>190 kWh/m<sup>2</sup></b>	<b>9.280 kW</b>	<b>21.165 MWh/a</b>
<b>Witterungsberein. 0,95 ohne 6113 - 6115</b>	<b>87.292 m<sup>2</sup></b>	<b>456</b>	<b>190 kWh/m<sup>2</sup></b> <b>5.584 h/a</b>	<b>3.068 kW</b>	<b>17.723 MWh/a</b>
<b>2. BA</b>	<b>74.000 m<sup>2</sup></b>	<b>731</b>	<b>190 kWh/m<sup>2</sup></b>	<b>2.518 kW</b>	<b>14.061 MWh/a</b>
<b>davon Kühlen</b>	<b>25.400 m<sup>2</sup></b>				
<b>UKJ gesamt Bedarf GZF=1,0 Wärme, Strom, GZF=0,9 HDD, Kälte</b>	<b>161.292 m<sup>2</sup></b>	<b>1.187</b>	<b>190 kWh/m<sup>2</sup></b>	<b>5.586 kW</b>	<b>31.784 MWh/a</b>

## Anhang 2 - Zusammenstellung der Kälte Bedarfs- und Verbrauchswerte

alle Flächen NGF	Bedarf				
	Basiswerte		Kälte		
Objekte	m²	Betten	Kennwert	Anschlußleistung kW	Bedarf MWh/a
6120 Systemfertigbau	3839				
6130 ehem. Dialyse	565				
6160 NTZ	445				
6113 KIM Bettenhaus	12.151 m²				
6114 Komplement	7.378 m²				
6115 KIM Laborgebäude	2.455 m²	360			
6211 UB-Süd 1	8.346 m²				
6212 UB-Süd 2	8.194 m²				
6213 UB-Süd 3	5.421 m²				
6214 UB-Süd 4	2.054 m²		19 W/m²	500 kW	561 MWh/a
6216 Bettenhaus 3	6.011 m²		19 W/m²	130 kW	152 MWh/a
6217 Bettenhaus 2	5.997 m²				
6215 UB-Nord 2	3.908 m²				
6218 Magistrale	8.136 m²				
6241 Eingangsgebäude	1.103 m²				
6220 Dienstleistungsz.	6.320 m²		71 W/m²	500 kW	585 MWh/a
6230 Forschungsgeb.	8.031 m²		72 W/m²	640 kW	749 MWh/a
6242 UB Nord 1	4.741 m²				
6243 Bettenhaus 1	6.593 m²				
6244 Laborgebäude	6.593 m²				
6219 Palliativgebäude	1.440 m²	12			
<b>1.BA gesamt installiert</b>	<b>109.721 m²</b>	<b>816</b>		<b>1.770 kW</b>	<b>2.047 MWh/a</b>
<b>Witterungsberein. 0,95 ohne 6113 - 6115</b>	<b>87.292 m²</b>	<b>456</b>			
<b>2. BA davon Kühlen</b>	<b>74.000 m² 25.400 m²</b>	<b>731</b>	<b>71 W/m² 1.170 h/a</b>	<b>1.541 kW</b>	<b>1.803 MWh/a</b>
<b>UKJ gesamt Bedarf GZF=1,0 Wärme, Strom, GZF=0,9 HDD, Kälte</b>	<b>161.292 m²</b>	<b>1.187</b>	<b>71 W/m² 1.170 h/a</b>	<b>3.134 kW</b>	<b>3.645 MWh/a</b>

## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 1

<b>Variante 1 - Fernwärme</b>	
<b>Bedarfswerte (inkl. Netzverluste)</b>	
Wärmeleistungsbedarf	7.284 kW
jährl. Wärmebedarf inkl. Netzverluste	18.210 MWh/a
Stromleistungsbedarf	5.586 kW
Strombedarf	31.784 MWh/a
<b>Fernwärmeübergabestationen</b>	
Übergabestationen	12 Stück
thermische Leistung	8.300 kW
Vollbenutzungsstunden	2.500 h
Fernwärmeleistung	7.284 kW
Fernwärmebedarf	18.210 MWh/a
<b>Finanzwirtschaft</b>	
Betrachtungszeitraum	15 Jahre
Teuerungsrate (1,8%)	2%
Aufzinsungsfaktor	3%
Barwertfaktor allgemein	13,614
preisdynamische Annuitätsfaktor allgemein	1,140
Energiesteigerungsrate	4%
Barwertfaktor Energie	15,596
preisdynamische Annuitätsfaktor Energie	1,306

<b>Variante 1 - Fernwärme</b>				
<b>Kapitalgebundene Kosten:</b>	<b>Nutzung</b>	<b>Invest</b>	<b>Annuität</b>	<b>Kosten</b>
Wärmetrasse zu Wärmeübertragerstationen 2.BA	30 Jahre	238.000 €	5,10%	12.143 €/a
Hausanschlußstationen 2.BA	30 Jahre	89.250 €	5,10%	4.553 €/a
Zwischensumme		327.250 €		
Unvorhergesehenes (5%)	30 Jahre	16.363 €	5,10%	835 €/a
Planung, Genehmigung, Gutachten, etc. (25%)	30 Jahre	81.813 €	5,10%	4.174 €/a
<b>Brutto-Kapitalkosten</b>				<b>21.705 €/a</b>

## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 1

<b>Variante 1 - Fernwärme</b>						
<b>Betriebsgebundene Kosten:</b>	<b>Invest</b>	<b>Instand- setzung</b>	<b>Wartung</b>	<b>Kosten</b>	<b>preisdyn. An.faktor</b>	<b>Jahreskosten Ø 15 Jahren</b>
Wärmeübertragerstationen 12 Stück	360.000 €	2,0%	1,0%	10.800 €/a	1,140	12.316 €/a
Wärmetrasse zu Wärmeübertragerstationen 1. und 2. BA	250.000 €	2,0%	1,0%	7.500 €/a	1,140	8.553 €/a
Bedienung Fernwärmestationen (15 h/a zu 40€/h)	40 €		0 h	0 €/a	1,140	0 €/a
<b>Brutto-Betriebskosten</b>				18.300 €/a		<b>20.869 €/a</b>

<b>Variante 1 - Fernwärme</b>			
<b>CO<sub>2</sub> Emissionen</b>			
Fernwärme	303 g/kWh <sub>Hi</sub>	Emissionsfaktor Erdgas	5.518 t/a
Stromerzeugung	575 g/kWh <sub>Hi</sub>	Emissionsfaktor Strommix	18.276 t/a
<b>Summe CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>			<b>23.793 t/a</b>

## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 1

<b>Variante 1 - Fernwärme</b>			
<b>Verbrauchsgebundene Kosten</b>		<b>preisdyn. Annuitätenfaktor</b>	<b>Jahreskosten Ø 15 Jahren</b>
<b>Fernwärme</b>			
Mischpreis	68,62 €/MWh		
Leistungspreis	25,9 €/kW		
Abgerechnete Leistung	10.000 kW/Monat		
Mess- und Verrechnungskosten	12.448 €/a	1,306	16.262 €/a
jährl. Verbrauchskosten Arbeit	1.249.570 €/a	1,306	1.632.438 €/a
jährl. Verbrauchskosten Leistung	259.300 €/a	1,306	338.749 €/a
<b>jährl. Verbrauchskosten Gesamt</b>	<b>1.521.318 €/a</b>	<b>1,306</b>	<b>1.987.449 €/a</b>
<b>Strom</b>			
Stromarbeitsmischpreis gesamt (inkl. Stromsteuer, Konz., KWK, EEG, MwSt.)	131,47 €/MWh		
Leistungspreis	55,25 €/MW		
Stromsteuer	20,50 €/MWh		
Mess- und Verrechnungskosten	2.074,61 €/a	1,306	2.710 €/a
jährl. Verbrauchskosten Arbeit	4.178.642 €/a	1,306	5.458.976 €/a
jährl. Verbrauchskosten Leistung	308.627 €/a	1,306	403.189 €/a
<b>jährl. Verbrauchskosten Gesamt</b>	<b>4.489.344 €/a</b>	<b>1,306</b>	<b>5.864.876 €/a</b>
<b>Wärmegestehungskosten</b>			<b>434 €/MWh</b>

## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 2

<b>Variante 2 - BHKW</b>	
<b>Bedarfswerte (inkl. Netzverluste)</b>	
Wärmeleistungsbedarf	7.284 kW
jährl. Wärmebedarf inkl. Netzverluste	18.210 kWh/a
Stromleistungsbedarf	5.586 kW
Strombedarf	31.784 MWh/a
<b>BHKW</b>	
Anzahl der Module	2
Gesamtnutzungsgrad	0,85
Stromkennziffer	0,79
Vollbenutzungsstunden Modul 1	8.720 h
Vollbenutzungsstunden Modul 2	6.760 h
Ø Vollbenutzungsstunden je Modul	7.740 h
thermische Leistung (Wasser) je Modul	642 kW
Thermischer Nutzungsgrad	0,48
Gesamt Thermische Netzeinspeiseleistung	1.284 kW
Gesamt Nutzwärmeerzeugung	9.938 MWh/a
elektrische Leistung je Modul	508 kW
Elektrischer Nutzungsgrad	0,38
Elektrischer Eigenverbrauch je Modul	12 kW
Gesamt elektrische Netzeinspeiseleistung	992 kW
Gesamt elektrische Netzeinspeisearbeit	7.678 MWh/a
<b>Niedertemperaturkessel</b>	
Kesstyp	Buderus SB825L
Kesselanzahl	3
thermische Leistung	8.300 kW
Kesselwirkungsgrad	0,95
Jahresnutzungsgrad	0,91
Vollbenutzungsstunden	997 h
erzeugte Nutzwärme	8.272 MWh/a
<b>Finanzwirtschaft</b>	
Betrachtungszeitraum	15 Jahre
Teuerungsrate (1,8%)	2%
Aufzinsungsfaktor	3%
Barwertfaktor allgemein	13,614
preisdynamische Annuitätsfaktor allgemein	1,140
Energieteuerungsrate	4%
Barwertfaktor Energie	15,596
preisdynamische Annuitätsfaktor Energie	1,306



## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 2

<b>Variante 2 - BHKW</b>				
<b>Kapitalgebundene Kosten:</b>	<b>Nutzung</b>	<b>Invest</b>	<b>Annuität</b>	<b>Kosten</b>
BHKW 2 x 508 kW Komplett	15 Jahre	674.644 €	8,38%	56.513 €/a
Gas-Kesselanlage	20 Jahre	214.200 €	6,72%	14.398 €/a
Pufferspeicher 12 m²	20 Jahre	20.230 €	6,72%	1.360 €/a
Kamin	40 Jahre	59.500 €	4,33%	2.574 €/a
hydr. Anbindung, Rohrleitung, Verteiler, Wärmedämmung, Netzpumpen	20 Jahre	160.650 €	6,72%	10.798 €/a
MSR, Regelung und elektr. Anschlussarbeiten	20 Jahre	133.280 €	6,72%	8.959 €/a
elektr. Anbindung, Trafo, Verteilung	30 Jahre	33.320 €	5,10%	1.700 €/a
Erdgasversorgung	20 Jahre	107.100 €	6,72%	7.199 €/a
Wärmetrasse zu Wärmeübertragerstationen 2.BA	20 Jahre	261.800 €	6,72%	17.597 €/a
Wärmeübertragerstationen 2.BA	20 Jahre	95.200 €	6,72%	6.399 €/a
Wärmetrasse Anbindung 1.BA	30 Jahre	300.000 €	5,10%	15.306 €/a
Anpassung Wärmeübertragerstationen 1.BA	20 Jahre	150.000 €	6,72%	10.082 €/a
Heizzentrale Leichtbau aus Trapezblech	50 Jahre	401.625 €	3,89%	15.609 €/a
Heizzentrale baulicher Innenausbau und Fundamente	50 Jahre	59.500 €	3,89%	2.312 €/a
Zwischensumme		2.671.049 €		
Unvorhergesehenes (5%)	20 Jahre	133.552 €	6,72%	8.977 €/a
Planung, Genehmigung, Gutachten, etc. (20%)	20 Jahre	534.210 €	6,72%	35.907 €/a
<b>Brutto-Kapitalkosten</b>				<b>215.690 €/a</b>

## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 2

<b>Variante 2 - BHKW</b>						
<b>Betriebsgebundene Kosten:</b>	<b>Invest</b>	<b>Instand- setzung</b>	<b>Wartung</b>	<b>Kosten Heute</b>	<b>preisdyn. An.faktor</b>	<b>Jahreskosten Ø 15 Jahren</b>
BHKW 2 x 508 kW Komplett (je erzeugtes KW <sub>elektr.</sub> 0,01 ct)	7.863.840 h		0,01 ct	78.638 €/a	1,140	89.678 €/a
BHKW Generalüberholung 118 €/kW nach 60.000 Betriebsstunden	119.888 €	6,7%		7.993 €/a	1,140	9.115 €/a
Gas-Kesselanlage	214.200 €	1,0%	1,5%	5.355 €/a	1,140	6.107 €/a
Pufferspeicher 12 m²	20.230 €	0,5%	0,5%	202 €/a	1,140	231 €/a
Kamin	59.500 €	1,0%	1,0%	1.190 €/a	1,140	1.357 €/a
hydr. Anbindung, Rohrleitung, Verteiler, Wärmedämmung, Netzpumpen	481.950 €	2,0%	1,5%	16.868 €/a	1,140	19.236 €/a
MSR, Regelung und elektr. Anschlussarbeiten	399.840 €	1,0%	1,0%	7.997 €/a	1,140	9.119 €/a
elektr. Anbindung, Trafo, Verteilung	33.320 €	1,0%	0,5%	500 €/a	1,140	570 €/a
Erdgasversorgung	107.100 €	1,0%	1,0%	2.142 €/a	1,140	2.443 €/a
Wärmetrasse zu Wärmeübertragerstationen 2.BA	261.800 €	1,0%	1,0%	5.236 €/a	1,140	5.971 €/a
Wärmeübertragerstationen 2.BA	95.200 €	1,0%	1,0%	1.904 €/a	1,140	2.171 €/a
Wärmetrasse Anbindung 1.BA	300.000 €	1,0%	1,0%	6.000 €/a	1,140	6.842 €/a
Anpassung Wärmeübertragerstationen 1.BA	150.000 €	1,0%	1,0%	3.000 €/a	1,140	3.421 €/a
Heizzentrale	401.625 €	1,0%	1,0%	8.033 €/a	1,140	9.160 €/a
Heizzentrale baulicher Innenausbau und Fundamente	59.500 €	1,0%	1,0%	1.190 €/a	1,140	1.357 €/a
Emissionsmessungen, Sachverständigenprüfungen				5.000 €/a	1,140	5.702 €/a
Verwaltung, Versicherungen etc. (1% Invest.BHKW)	674.644 €			6.746 €/a	1,140	7.694 €/a
Bedienung Gaskesselanlage (20 h/a zu 40€/h)	40 €		40 h	1.600 €/a	1,140	1.825 €/a
Bedienung BHKW (200 h/a zu 40€/h)	40 €		100 h	4.000 €/a	1,140	4.562 €/a
<b>Brutto-Betriebskosten</b>				<b>163.594 €/a</b>		<b>186.560 €/a</b>

## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 2

<b>Variante 2 - BHKW</b>			
<b>Verbrauchsgebundene Kosten</b>		<b>preisdyn. Annuitätenfaktor</b>	<b>Jahreskosten Ø 15 Jahren</b>
<b>Erdgas</b>			
Arbeitspreis Erdgas ohne Steuern	37,09 €/MWh		
bisherige Mineralölsteuer auf Erdgas	5,50 €/MWh		
Arbeitspreis für BHKW (Energiesteuerbefreit)	37,09 €/MWh		
Arbeitspreis Kessel	42,59 €/MWh		
Leistungspreis	17,04 €/MW		
Mess- und Verrechnungskosten	1.835 €/a	1,306	2.398 €/a
jährl. Verbrauchskosten Arbeit	1.574.266 €/a	1,306	2.056.619 €/a
jährl. Verbrauchskosten Leistung	141.432 €/a	1,306	184.767 €/a
<b>jährl. Verbrauchskosten gesamt</b>	<b>1.717.533 €/a</b>	<b>1,306</b>	<b>2.243.784 €/a</b>
<b>Strom</b>			
Stromarbeitsmischpreis gesamt (inkl. Stromsteuer, Konz., KWK, EEG, MwSt.)	131,47 €/MWh		
Leistungspreis	55,25 €/MW		
Stromsteuer	20,50 €/MWh		
Mess- und Verrechnungskosten	2.075 €/a	1,306	2.710 €/a
jährl. Verbrauchskosten Arbeit	3.169.205 €/a	1,306	4.140.248 €/a
jährl. Verbrauchskosten Leistung	253.819 €/a	1,306	331.588 €/a
<b>jährl. Verbrauchskosten gesamt</b>	<b>3.425.098 €/a</b>	<b>1,306</b>	<b>4.474.546 €/a</b>
<b>Wärmegestehungskosten</b>			<b>383 €/a</b>

## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 2

<b>Variante 2 - BHKW</b>		
<b>Energiebilanz</b>		
<b>BHKW</b>		
Anzahl der Module		2
Gesamtnutzungsgrad		0,85
Stromkennziffer		0,79
Vollbenutzungsstunden Modul 1		8.720 h
Vollbenutzungsstunden Modul 2		6.760 h
Ø Vollbenutzungsstunden je Modul		7.740 h
thermische Leistung (Wasser) je Modul		642 kW
Thermischer Nutzungsgrad		0,48
Gesamt Thermische Netzeinspeiseleistung	2 x 642 kW	1.284 kW
Gesamt Nutzwärmeerzeugung	2 x 642 kW x 7.740 h	9.938.160 kWh/a
elektrische Leistung je Modul		508 kW
Elektrischer Nutzungsgrad		0,38
Elektrischer Eigenverbrauch je Modul		12 kW
Gesamt elektrische Netzeinspeiseleistung	2 x 508 kW - 12 kW	992 kW
Gesamt elektrische Netzeinspeisearbeit	2 x 496 kW x 7740 h	7.678 MWh/a
Brennstoffleistung je Modul		1.346 kW
Brennstoffverbrauch (Hi) je Modul	1.346 kW x 7.740 h / 0,85	12.256.518 kWh/a
Brennstoffverbrauch (Hs) je Modul	12.256 MW x 1,1	13.482.169 kWh/a
Brennstoffverbrauch BHKW (Hs)	12.256 MW x 1,1 x 2	26.964.339 kWh/a
<b>Kessel</b>		
thermische Leistung		8.300 kW
Kesselwirkungsgrad		0,95
Jahresnutzungsgrad		0,91
Vollbenutzungsstunden		997 h
erzeugte Nutzwärme	18.210 MWh/a - 9.938 MWh/a	8.271.840 kWh/a
Brennstoffverbrauch (Hi)	8.271 MW / 0,91	9.089.934 kWh/a
Brennstoffverbrauch Kessel (Hs)	9.089 MW x 1,1	9.998.927 kWh/a
<b>Gesamtbrennstoffverbrauch (Hs)</b>	<b>BHKW + Kessel</b>	<b>36.963.266 kWh/a</b>

## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 2

<b>Variante 2 - BHKW</b>				
<b>Gutschriften</b>		<b>Barwert Faktor</b>	<b>preisdyn. An.faktor</b>	<b>Jahreserlöse Ø 15 Jahren</b>
<b>Erdgas</b>				
Gutschrift aus Befreiung der Energiesteuer	148.304 €/a	1,000	1,000	148.304 €/a
<b>Strom</b>				
Gutschrift für vermiedene Netzkosten	3.455 €/a	13,614	1,140	3.940 €/a
<b>Gesamtgutschrift</b>				<b>152.244 €/a</b>

<b>Variante 2 - BHKW</b>			
<b>Emissionen</b>			
Kessel	205 g/kWh <sub>Hi</sub>	Emissionsfaktor Erdgas	1.863 t/a
BHKW	205 g/kWh <sub>Hi</sub>	Emissionsfaktor Erdgas	5.025 t/a
Stromerzeugung	575 g/kWh <sub>Hi</sub>	Emissionsfaktor Strommix	13.861 t/a
<b>Summe CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>			<b>20.750 t/a</b>

## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 3

<b>Variante 3 - Kesselanlage</b>	
<b>Bedarfwerte (inkl. Netzverluste)</b>	
Wärmeleistungsbedarf	7.284 kW
jährl. Wärmebedarf inkl. Netzverluste	18.210 MWh/a
Stromleistungsbedarf	5.586 kW
Strombedarf	31.784 MWh/a
<b>Niedertemperaturkessel</b>	
Kesstyp	Buderus SB825L
Kesselanzahl	3
thermische Leistung	8.300 kW
Kesselwirkungsgrad	0,95
Jahresnutzungsgrad	0,91
Vollbenutzungsstunden	2.142 h
erzeugte Nutzwärme	18.210 MWh/a
<b>Finanzwirtschaft</b>	
Betrachtungszeitraum	15 Jahre
Teuerungsrate (1,8%)	2%
Aufzinsungsfaktor	3%
Barwertfaktor allgemein	13,614
preisdynamische Annuitätsfaktor allgemein	1,140
Energieteuerungsrate	4%
Barwertfaktor Energie	15,596
preisdynamische Annuitätsfaktor Energie	1,306

## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 3

<b>Variante 3 - Kesselanlage</b>				
<b>Kapitalgebundene Kosten:</b>	<b>Nutzung</b>	<b>Invest</b>	<b>Annuität</b>	<b>Kosten</b>
Gas-Kesselanlage	20 Jahre	214.200 €	6,72%	14.398 €/a
Kamin	20 Jahre	41.650 €	6,72%	2.800 €/a
hydr. Anbindung, Rohrleitung, Verteiler, Wärmedämmung, Netzpumpen	20 Jahre	116.620 €	6,72%	7.839 €/a
MSR, Regelung und elektr. Anschlussarbeiten	20 Jahre	95.200 €	6,72%	6.399 €/a
Erdgasversorgung	40 Jahre	101.150 €	4,33%	4.376 €/a
Wärmetrasse zu Wärmeübertragerstationen 2.BA	20 Jahre	261.800 €	6,72%	17.597 €/a
Hausanschlußstationen 2.BA	20 Jahre	95.200 €	6,72%	6.399 €/a
Wärmetrasse Anbindung 1.BA	20 Jahre	300.000 €	6,72%	20.165 €/a
Anpassung Wärmeübertragerstationen 1.BA	20 Jahre	150.000 €	6,72%	10.082 €/a
Heizzentrale	50 Jahre	240.975 €	3,89%	9.366 €/a
Heizzentrale baulicher Innenausbau und Fundamente	50 Jahre	35.700 €	3,89%	1.387 €/a
Zwischensumme		1.652.495 €		
Unvorhergesehenes (5%)	20 Jahre	82.625 €	6,72%	5.554 €/a
Planung, Genehmigung, Gutachten, etc. (20%)	20 Jahre	330.499 €	6,72%	22.215 €/a
<b>Brutto-Kapitalkosten</b>				<b>128.575 €/a</b>

## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 3

<b>Variante 3 - Kesselanlage</b>						
<b>Betriebsgebundene Kosten:</b>	<b>Invest</b>	<b>Instand- setzung</b>	<b>Wartung</b>	<b>Kosten</b>	<b>preisdyn. An.faktor</b>	<b>Jahreskosten Ø 15 Jahren</b>
Gas-Kesselanlage	214.200 €	1,0%	1,5%	5.355 €/a	1,140	6.107 €/a
Kamin	41.650 €	1,0%	1,0%	833 €/a	1,140	950 €/a
hydr. Anbindung, Rohrleitung, Verteiler, Wärmedämmung, Netzpumpen	116.620 €	2,0%	1,5%	4.082 €/a	1,140	4.655 €/a
MSR, Regelung und elektr. Anschlussarbeiten	95.200 €	1,0%	1,0%	1.904 €/a	1,140	2.171 €/a
Erdgasversorgung	101.150 €	1,0%	1,0%	2.023 €/a	1,140	2.307 €/a
	0 €					
Wärmetrasse zu Wärmeübertragerstationen 2.BA	261.800 €	1,0%	1,0%	5.236 €/a	1,140	5.971 €/a
Hausanschlußstationen 2.BA	95.200 €	1,0%	1,0%	1.904 €/a	1,140	2.171 €/a
Wärmetrasse Anbindung 1.BA	300.000 €	1,0%	1,0%	6.000 €/a	1,140	6.842 €/a
Anpassung Wärmeübertragerstationen 1.BA	150.000 €	1,0%	1,0%	3.000 €/a	1,140	3.421 €/a
Heizzentrale	240.975 €	1,0%	1,0%	4.820 €/a	1,140	5.496 €/a
Heizzentrale baulicher Innenausbau und Fundamente	35.700 €	1,0%	1,0%	714 €/a	1,140	814 €/a
Emissionsmessungen, Sachverständigenprüfungen				1.000 €/a	1,140	1.140 €/a
Bedienung Gaskesselanlage (20 h x 2 /a zu 40€/h)	40 €		40 h	1.600 €/a	1,140	1.825 €/a
<b>Brutto-Betriebskosten</b>				<b>38.470 €/a</b>		<b>43.871 €/a</b>



## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 3

<b>Variante 3 - Kesselanlage</b>			
<b>Verbrauchsgebundene Kosten</b>		<b>preisdyn. Annuitätenfaktor</b>	<b>Jahreskosten Ø 15 Jahren</b>
<b>Erdgas</b>			
Arbeitspreis Erdgas ohne Steuern	37,09 €/MWh		
bisherige Mineralölsteuer auf Erdgas	5,50 €/MWh		
Arbeitspreis für BHKW (Energiesteuerbefreit)	37,09 €/MWh		
Arbeitspreis Kessel	42,59 €/MWh		
Leistungspreis	17,04 €/MW		
Mess- und Verrechnungskosten	1.835 €/a	1,306	2.398 €/a
jährl. Verbrauchskosten Arbeit	937.495 €/a	1,306	1.224.743 €/a
jährl. Verbrauchskosten Leistung	141.432 €/a	1,306	184.767 €/a
<b>jährl. Verbrauchskosten Gesamt</b>	<b>1.080.762 €/a</b>	<b>1,306</b>	<b>1.411.907 €/a</b>
<b>Strom</b>			
Stromarbeitsmischpreis gesamt (inkl. Stromsteuer, Konz., KWK, EEG, MwSt.)	131,47 €/MWh		
Leistungspreis	55,25 €/MW		
Stromsteuer	20,50 €/MWh		
Mess- und Verrechnungskosten	2.074,61 €/a	1,306	2.710 €/a
jährl. Verbrauchskosten Arbeit	4.178.642 €/a	1,306	5.458.976 €/a
jährl. Verbrauchskosten Leistung	308.627 €/a	1,306	403.189 €/a
<b>jährl. Verbrauchskosten Gesamt</b>	<b>4.489.344 €/a</b>	<b>1,306</b>	<b>5.864.876 €/a</b>
<b>WärmeGESTEHUNGSKOSTEN</b>			<b>409 €/a</b>

## Anhang 3 – Wirtschaftlichkeitsberechnung – Variante 3

Variante 3 - Kesselanlage		
Energiebilanz		
Kessel		
thermische Leistung		8.300 kWh
Kesselwirkungsgrad		0,95
Jahresnutzungsgrad		0,91
Vollbenutzungsstunden		2.194 h
erzeugte Nutzwärme		18.210 MWh/a
Brennstoffverbrauch (Hi)		20.011 MWh/a
<b>Brennstoffverbrauch (Hs)</b>	20.011 MW x 1,1	<b>22.012 MWh/a</b>

Variante 3 - Kesselanlage		
Emissionen		
CO <sub>2</sub>		
Kessel	205 g/kWh <sub>Hi</sub> Emissionsfaktor Erdgas	4.102 t/a
Stromerzeugung	575 g/kWh <sub>Hi</sub> Emissionsfaktor Strommix	18.276 t/a
<b>Summe CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>		<b>22.378 t/a</b>



- (1) Deutsche Krankenhausgesellschaft e.V., Krankenhausstatistik. Verlag Deutsche Krankenhausgesellschaft e.V., Berlin 2009
- (2) Vertragsparteien: Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, Sekretariat der Klimarahmenkonvention, New York 1992.
- (3) Prof. Dr. Ralf. Hartig, Kraftwerke - Kernelemente der Stromversorgung, Fachhochschule Mittweida, Mittweida 2007
- (4) Konstantin Panos, Praxisbuch der Energiewirtschaft, Springer Verlag Berlin Heidelberg, Berlin 2007, ISBN 978-3-540-78591-0
- (5) Kark Schmitz, G. Schaumann, Kraft-Wärme-Kopplung, Springer Verlag Berlin Heidelberg, Berlin 2005.
- (6) Stadtwerke Eberswalde GmbH, <http://www.stadtwerke-eberswalde.de/waerme/kraft-waerme-kopplung.php>, verfügbar am 24. 07 2009
- (7) Wolfgang Suttor, Blockheizkraftwerke- Ein Leitfaden für den Anwender, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Berlin 2006, ISBN 3-934595-47-2
- (8) Karl Strauß, Kraftwerkstechnik, Springer Verlag Berlin Heidelberg Dordrecht 2009, ISBN 978-3-642-01430-7
- (9) Richard Dolezal, Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke, Springer Verlag Berlin Heidelberg, Berlin 2001, ISBN 3-540-67526-4
- (10) Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG, Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel 2004.
- (11) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Kleine Kraft-Wärmekopplung für den Klimaschutz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin 2005
- (12) Uwe Milles, BINE Informationsdienst - Kraft und Wärme koppeln, Basis Energie 21, FIZ Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 2006
- (13) Prof. Dr. Ralf. Hartig, EM - 1 Energie und ihre Nutzung, Fachhochschule Mittweida, Mittweida 2007

- (14) Markus Gailfuß, Blockheizkraftwerke - Grundlagen, Planung und Rahmenbedingungen - Seminarunterlagen, BHKW-Consult, Rastatt 2008
- (15) Verband der Elektrizitätswirtschaft - VDEW. e.V. -. Lexikon Energiewelten, Fachverband für Energie-Marketing und -Anwendung (HEA) e.V., Frankfurt 2004
- (16) Richard A. Zahoransky, Energietechnik, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH Braunschweig, Wiesbaden 2002
- (17) Michael Koschowitz, Kraft-Wärme-Kopplungs-Technologien, E.ON Ruhrgas AG, Essen 2004
- (18) Verein Deutscher Ingenieure, VDI 3985 - Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Verbrennungskraftmaschinen, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf 2004
- (19) Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2067 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf 2000
- (20) Dr. Ing. Reinhard Schmidt, Dipl.-Ing. Klaus Höhn, Technisches Fachgespräch zur Konstruktion der geordneten und bereinigten Wärmebedarfsjahreslinie 1. und 2. BA, Jena 19. 08 2010.
- (21) Uwe Glock, Katalog 2010 - Teil 2 - Zentralheizungsanlagen ab 70 kW, Bosch Thermotechnik GmbH, Wetzlar 2010
- (22) ASUE, BHKW-Kenndaten 2005, : ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Frankfurt 2005
- (23) Dipl.-Ing. Andreas Scheunemann, Dipl.-Kfm. Martin Becker, Kennziffernkatalog - Investitionsvorbereitung in der Energiewirtschaft, GfEM Gesellschaft für Energiemanagement, Energy Consulting, Neuenhagen / Berlin 2006
- (24) Statistisches Bundesamt, Verbraucherpreisindizes für Deutschland, Artikelnummer: 2170700101074 - Fachserie 17 Reihe, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2010
- (25) KfW Bankengruppe, [http://www.kfw.de/DE\\_Home/Service/Foerderprogramme\\_auf\\_einen\\_Blick/Foerderangebot\\_fuer\\_Kommunen.jsp](http://www.kfw.de/DE_Home/Service/Foerderprogramme_auf_einen_Blick/Foerderangebot_fuer_Kommunen.jsp), verfügbar am 11. 10 2010

- (26) Bundesministerium der Finanzen, Energiesteuergesetz, zuletzt geändert durch Art. 13 vom 22.12.2009, Bundesministerium der Finanzen, Berlin 2009
- (27) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, zuletzt geändert durch Art. 5 vom 21.08.2009, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin 2009
- (28) Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Emissionsfaktor>  
Emissionsfaktoren, verfügbar am 30.09 2010
- (29) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2008 und erste Schätzung 2009, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin 2010
- (30) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für Energieträger im Bereich von Haushalten/Gewerbe, Handel, Dienstleistungen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin 2005
- (31) Rolf-Günter Nolden, Industriebetriebslehre, Stamm Verlag, Köln 2000, ISBN 3-8237-0560-1.
- (32) Verein Deutscher Ingenieure, VDI 3807 - Energieverbrauchskennwerte für Gebäude - Heizenergie- und Stromverbrauchskennwerte, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf 2007

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht zu haben.

---

Ort, Datum

---

Lars Stiebritz